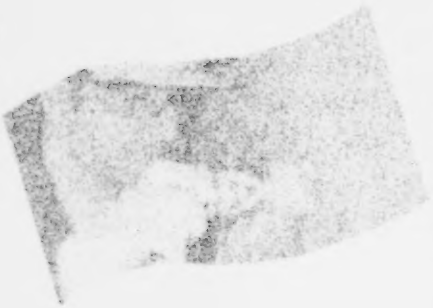
Conception d'un nouvel appareil d'auscultation des couches de béton projeté sur les parois des galeries de mines souterraines

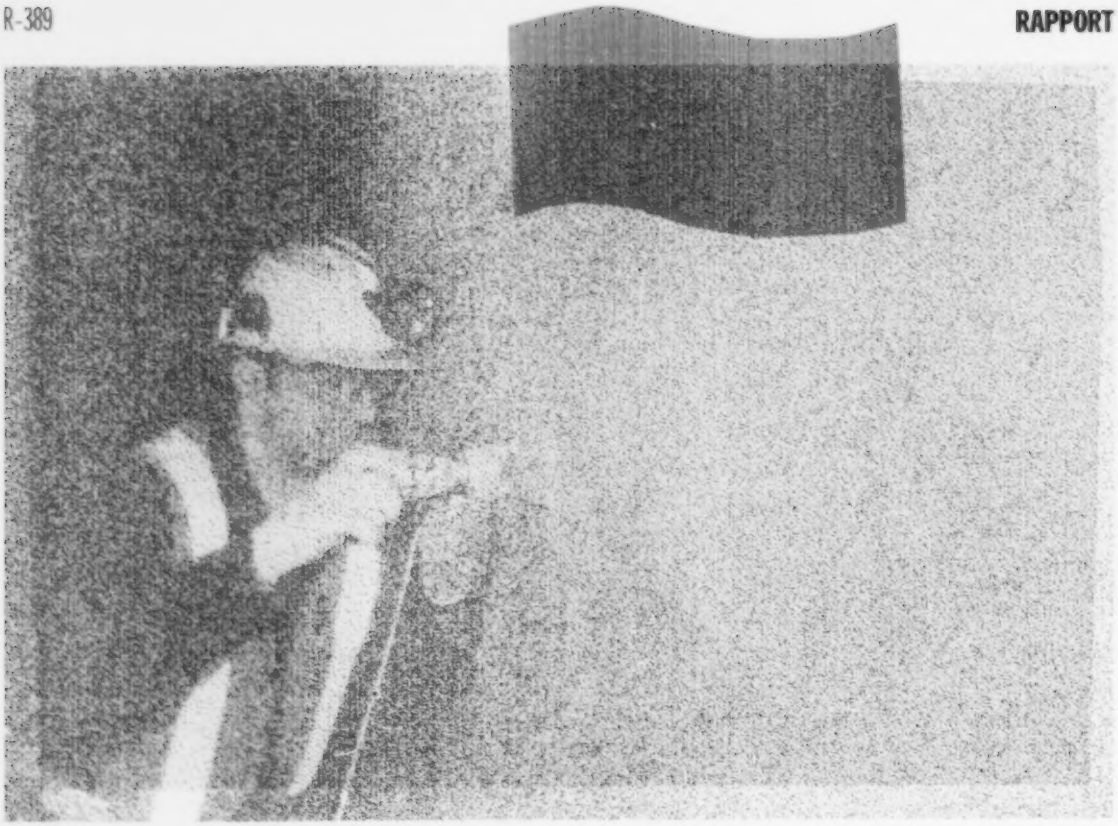


ÉTUDES ET RECHERCHES

Ferri P. Hassani
Moe Momayez

R-389

RAPPORT



irsst

105-06348/

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2004

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

• Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, novembre 2004

Conception d'un nouvel appareil d'auscultation des couches de béton projeté sur les parois des galeries de mines souterraines

Ferri P. Hassani et Moe Momayez
Département de génie des mines, Université McGill

ÉTUDES ET RECHERCHES

ANNEXE

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les faits saillants d'une étude sur la faisabilité de l'auscultation des parois de béton projeté dans les mines souterraines à l'aide d'une méthode d'auscultation non destructive appelée *MSR Impact-Écho* développée par le laboratoire d'auscultation non destructive de l'université McGill. Le béton projeté est couramment utilisé dans les mines souterraines comme moyen de support de terrain qui garantie jusqu'à un certain point la sécurité des ouvriers. Malgré certains avantages importants de ce type de système de support de terrain, plusieurs problèmes ont été identifiés tels que le manque d'un système de contrôle de la qualité en ce qui concerne l'application du béton projeté et l'état réel de la couche de béton projeté.

Le rapport présente une revue de la littérature abordant les méthodes d'auscultation non destructives suivi d'une description de la version améliorée du système *MSR Impact-Écho* pour mesurer l'épaisseur et la qualité du béton projeté. Une étude sur les propriétés dynamiques du béton projeté de type NOVOCON® a été réalisée à l'aide de ce système, soit un type normal de résistance ultime de 35 MPa et un autre ayant la même résistance, mais avec des fibres métalliques.

Les résultats tirés des essais en laboratoire sur des échantillons de béton projeté ayant différentes épaisseurs (5, 10, 15 et 20 cm) montrent qu'il faut s'attendre à une vitesse d'onde de compression et de cisaillement supérieure dans le béton projeté ayant des fibres métalliques. Dans le cas du béton projeté sans fibres, la vitesse moyenne de l'onde de compression est de 3680 m/s et celle de l'onde de cisaillement est égale à 2224 m/s. En ce qui concerne le béton projeté avec fibres métalliques, la vitesse de l'onde de compression et de cisaillement est de 4020 m/s et 2415 m/s respectivement. Les vitesses d'ondes de compression et de cisaillement, déterminées par la voie de ces essais ont été utilisées avec succès dans une auscultation en chantier. Dans la mesure du possible, il est préférable de procéder à une calibration avant de commencer une série d'acquisition afin d'avoir des valeurs de vitesse les plus précises pour chaque site. Les propriétés mécaniques du béton projeté déterminées avec la méthode MSR Impact-Écho sont en moyenne entre 12% et 25% inférieures aux valeurs statiques en ce qui concerne le module d'élasticité et entre 0% et 12% pour le coefficient de Poisson .

Plusieurs visites à des mines souterraines ont permis de vérifier la faisabilité du concept et d'établir un devis technique pour mesurer l'épaisseur et les propriétés mécaniques du béton projeté dans un environnement hostile. Les essais effectués à l'aide d'un prototype robuste et portable développé dans le cadre de ce projet ont confirmé qu'il est possible de déterminer l'épaisseur du béton projeté avec une précision allant de quelques millimètres (en général) jusqu'à 1 cm (dans un seul cas) et d'en faire l'évaluation des propriétés élastiques dynamiques. Une nouvelle procédure de préparation de surface du béton, nous a permis de pouvoir ausculter des épaisseurs de plus en plus minces. La limite établie à date pour le béton projeté se situe aux alentours de 5 cm. Toutefois, il reste à améliorer certains points tels que la possibilité de mesurer des épaisseurs de moins de 50 mm et la miniaturisation du système afin de permettre à l'usager de porter l'instrument en tout temps sur lui, soit dans sa main, sur son épaule ou autour de sa taille.

Les auteurs de ce rapport ont également utilisé cette technologie avec succès dans d'autres domaines d'application tels que l'évaluation de la qualité des cellules d'électrolyse dans les affineries à l'est de Montréal et la localisation des conduits de câbles de haute tension dans la plate-forme des tunnels dans le métro de Montréal.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport témoignent leur profonde reconnaissance à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) pour son soutien financier grâce auquel ce projet a pu être mené.

Nous sommes très reconnaissants envers les examinateurs qui ont amélioré la forme et le contenu de ce document grâce à leurs commentaires et observations.

Enfin, nous tenons à remercier l'association minière du Québec, les compagnies minières ainsi que le métro de Montréal qui ont apporté leur soutien matériel au cours de nos travaux sur le terrain.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ ii
REMERCIEMENTS iii
TABLE DES MATIÈRES iv
LISTE DES FIGURES vi
LISTE DES TABLEAUX viii
1.0 INTRODUCTION 1
1.1 Problématique 1
1.2 Objectifs 3
1.3 Organisation du rapport 4
2.0 REVUE DE LA LITTERATURE 5
2.1 La méthode *MSR Impact-Écho* 6
3.0 INSTRUMENTATION 10
4.0 ESSAIS EN LABORATOIRE 14
4.1 Programme de recherche 14
4.2 Développement expérimental 14
4.3 Résultats et discussion 16
4.4 Mesure des propriétés dynamiques du béton projeté 22
4.5 Mesure de l'impédance acoustique du béton projeté 23
4.6 Sommaire 24
5.0 ESSAIS EN CHANTIER 25
5.1 Premier essai dans une mine souterraine 25
5.1.1 Programme de recherche 25
5.1.2 Résultats et discussions 26
5.2 Deuxième visite à une mine souterraine 28
5.2.1 Programme de recherche 28
5.2.2 Résultats et discussions 29
5.3 Auscultation de cellules d'électrolyse 31
5.3.1 Programme d'investigation 31
5.3.2 Résultats et discussions 33
5.4 Localisation des conduits électriques dans le métro de Montréal 38
5.4.1 Programme d'investigation 38
5.4.2 Résultats et discussion 39
6.0 CONCLUSIONS 42
7.0 BIBLIOGRAPHIE 44
A.0 Revue de la littérature 48
A.1 Les méthodes nucléaires 48
A.1.1 La radiographie 48
Principes de base 48
A.1.2 La radiométrie 50
A.2 Les méthodes électriques 51
A.2.1 Nature électrique du béton 51
2.2.2 Propriétés électriques du béton 52
A.3 Les méthodes électromagnétiques 56
A.3.1 Propagation des micro-ondes à travers un matériau: 56

A.3.2 La méthode géoradar 58
A.4 Les méthodes magnétiques 59
A.4.1 Perte de flux 59
A.4.2 Courants de Foucault (Eddy Current) 60
A.5 La méthode par thermographie infrarouge 62
A.6 L'auscultation par les émissions acoustiques 63
A.7 Les méthodes par ultrasons 67
A.8 Les méthodes mécaniques : la méthode *MSR Impact-écho* 69

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Illustration des boulons d'étançonnement et du treillis métallique de rétention. 2
Figure 1.2: Illustration de l'application du béton projeté dans les mines. 3

Figure 2.1: Fonctions principales des méthodes non destructives pour le béton. 5
Figure 2.2: Principe de la méthode MSR Impact-Écho. 7
Figure 2.3: Exemples de spectres d'amplitudes et la détection d'une fissure. 8
Figure 2.4: Vue schématique de la méthode MSR Impact-Écho. 9

Figure 3.1: Deuxième génération des capteurs du système MSR Impact-Écho. 10
Figure 3.2: Derniers Capteurs du système MSR Impact-Écho. 10
Figure 3.3: Signal caractéristique du système MSR Impact-Écho. 11
Figure 3.4: Transformée de Fourier du signal ci-dessus. 12
Figure 3.5: Système MSR Impact-Écho et les sources d'impact. 12
Figure 3.6: Système MSR Impact-Écho, le module comprenant le capteur et le conditionneur des signaux. 13

Figure 4.1: Les huit dalles soumises aux essais MSR Impact-Écho. 16
Figure 4.2: Vu de dessus d'une des dalles montrant les deux types de surfaces auscultés. 16
Figure 4.3: Signal type capté par le système d'acquisition MSR Impat-Écho. 17
Figure 4.4: Vitesses des ondes de compression obtenues avec la source d'impact à bout sphérique de 3 mm de diamètre. 19
Figure 4.5: Vitesses des ondes de compression obtenues avec la source de 2 mm. 20
Figure 4.6: Vitesses des ondes de compression obtenues avec la source de 1.3 mm. 21

Figure 5.1: Vue schématique des lignes d'auscultation. 26
Figure 5.2: Position type du capteur et de la source d'impact. 27
Figure 5.3: Site d'essai dans une mine souterraine. 29
Figure 5.4: Exemple type du polissage de la surface du béton projeté. 30
Figure 5.5: Coupe type du côté du drain. 32
Figure 5.6: Coupe type du côté du trop-plein. 32
Figure 5.7: Disposition type des cellules d'électrolyse dans les sections SUD et NORD. 33
Figure 5.8: Coupes types d'une cellule provenant de la série Nord. 34
Figure 5.9: Distribution des vitesses d'ondes obtenues sur le panneau 4' x 4'. 37
Figure 5.10: L'emplacement des conduits électriques dans la plate-forme du métro. 39
Figure 5.11: Travaux de préparation de la surface du béton et acquisition de données. 39
Figure 5.12: Les ondes traversent le béton perpendiculairement à la surface et atteignent leur cible. 40
Figure 5.13: Les ondes traversent le béton en diagonale et atteignent leur cible. 41
Figure 5.14: La tige de forage manque sa cible. 41

Figure A.1: Un système type à rayons X [d'après Mix, 1987]. 48
Figure A.2: La technique par radiométrie. 50
Figure A.3: Pénétration d'humidité à travers un spécimen cubique. 54
Figure A.4: La méthode par résistivité électrique. 55

Figure A.5: Principe de propagation des micro-ondes 57
Figure A.6: Les effets des discontinuités sur le flux magnétique. 60
Figure A.7: Schéma de trois applications par courants de Foulcault. 61
Figure A.8: Système PUNDIT à ultrasons. 69
Figure A.9: Principe de la méthode MSR Impact-écho. 70
Figure A.10: Exemples de spectres d'amplitudes et la détection d'une fissure. 71
Figure A.11: Vue schématique de la méthode MSR Impact-écho. 72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1: Composition du mélange de béton projeté. 15
Tableau 4.2: Vitesse de l'onde de compression et de cisaillement dans les dalles de béton projeté. 22
Tableau 4.3: Propriétés mécaniques dynamiques et statiques du béton projeté avec fibres métalliques. 22
Tableau 4.4: Propriétés mécaniques dynamiques et statiques du béton projeté sans fibres métalliques. 22
Tableau 4.5: Impédance acoustique de certains matériaux. 23
Tableau 4.6: Impédance acoustique des dalles de béton projeté. 23

Tableau 5.1: Épaisseurs de la paroi de béton projeté. 26
Tableau 5.2: Résultats des essais MSR Impact-Écho. 28
Tableau 5.3: Deuxième série de résultats d'essais MSR Impact-Écho. 30
Tableau 5.4: Vitesses des ultrasons à travers le panneau de 4'x 4'. 36
Tableau 5.5: Vitesses des ultrasons observés sur la colonne 11 du panneau de 4'x 4'. 36
Tableau 5.6: Vitesses Cp obtenus avec le système MSR Impact-écho sur les échantillons A et B. 38
Tableau 5.7: Distance entre la face verticale de la plate-forme et les conduits électriques. 40

Tableau A.1: Méthodes d'analyses d'émissions acoustiques. 65

1.0 INTRODUCTION

Le contrôle de terrain a un intérêt crucial pour l'industrie des mines souterraines. Le maintien d'un environnement de travail sécuritaire requiert parfois l'utilisation de techniques pour garantir la stabilité des réseaux souterrains. Ceci est le cas dans plusieurs mines à exploitation souterraine qui ont opté pour le béton projeté comme méthode pour s'assurer d'un bon niveau de contrôle de terrain. L'objectif de ce rapport est de présenter le développement d'une nouvelle méthode d'auscultation des parois en béton projeté, celle-ci permettant l'évaluation de l'épaisseur et l'étude de paramètres physico mécaniques des parois.

Après une revue de la littérature, les résultats des tests effectués à l'aide d'un prototype, en laboratoire et sur le terrain, seront détaillés et leur validité discutée. Cette étude permet alors d'optimiser l'appareil par une suite de modifications testées une à une sur le terrain.

1.1 Problématique

Le contrôle de terrain dans les mines souterraines est un champ d'activité d'une très grande importance pour l'industrie minière. La production d'une mine est directement liée à un bon contrôle des conditions souterraines. Cela assure la sécurité des mineurs en réduisant le risque d'effondrements. Lorsqu'un tunnel est foré dans le roc, il reste souvent des roches branlantes sur le toit et les parois. Il va de soi que plusieurs techniques ont été développées afin de limiter les accidents et augmenter, en général, la sécurité des mineurs. Malgré des progrès significatifs dans le domaine du contrôle de terrain, des accidents peuvent toujours survenir. La sévérité des blessures corporelles attribuables à un mauvais contrôle de terrain varie de légères jusqu'à la perte de vie. Le type d'accident qui nous intéresse est le résultat de chutes de pierres branlantes provenant du massif rocheux. L'industrie minière québécoise regroupe quelque 5000 ouvriers et ouvrières travaillants sous terre. Ils sont tous assujettis aux accidents mentionnés. Depuis 1994, il y a eu *230 cas* d'accidents d'après APSM. En 1995, le coût direct annuel à la CSST a été de l'ordre de 688,500$ ou 8,500$ par cas.

En général, il y a quatre (4) méthodes utilisées pour le contrôle de terrain dans les milieux souterrains. La première technique de contrôle consiste à ajouter des boulons d'étançonnement dans le massif rocheux à des intervalles réguliers. Ces boulons d'étançonnement sont des longues tiges en métal insérées dans des trous forés. Ils sont ancrés dans le roc à l'aide d'un coulis de ciment. Ils servent à sécuriser les roches branlantes sur les parois et le toit des tunnels. Parfois, il est nécessaire de stabiliser plusieurs roches. Cette activité produit des coûts excessifs en contrôle de terrain. Parfois, là où les roches branlantes sont trop nombreuses, on ajoute un treillis métallique de rétention façonnée aux boulons d'étançonnement. Celle-ci est la deuxième méthode de contrôle de terrain. Le treillis métallique peut couvrir toute la surface exposée sauf le sol. Ce système de contrôle sert aussi à prédire des problèmes éventuels. On peut suivre de prêt le mouvement du treillis sur les parois et le toit du tunnel. Tout mouvement anormal indique une condition dangereuse. La figure 1.1 illustre ces deux types de contrôle de terrain.

Occasionnellement un revêtement de béton est utilisé dans les puits d'accès conduisant aux tunnels souterrains. Ce type d'ouvrage assure une bonne stabilité dans les puits. Malgré les avantages de cette technique de contrôle de terrain, il y a un inconvénient majeur, soit celui du

temps requis pour compléter le travail. Un délai est requis pour construire et placer le coffrage, un autre délai pour la coulée et finalement pour la cure du béton. Il n'est donc pas avantageux d'utiliser cette technique dans les tunnels car le taux d'extraction du minerai ralentira et réduira la production de la mine.

La quatrième technique de contrôle de terrain est celle qui nous intéresse ici. Le béton projeté est une méthode d'application qui consiste à projeter le béton à haute vélocité sur une surface à l'aide de jets d'air comprimé. En général, la formulation d'un mélange de béton projeté doit être bien adaptée en fonction de son application, contenant une teneur en liant un peu plus élevé qu'un mélange de béton standard, ainsi qu'une dimension maximale des granulats de 10mm de diamètre. Cette technique est rapide, économique et efficace. De plus en plus, les mines souterraines utilisent cette méthode comme moyen de contrôle de terrain au lieu des boulons d'étançonnement et des treillis métalliques de rétention. Parfois, on applique le béton projeté dans des endroits potentiellement problématiques où l'on a déjà utilisé une autre méthode de contrôle de terrain. Les avantages économiques ainsi que l'augmentation de la sécurité des mineurs ont poussé les mines souterraines à opter pour ce mécanisme de contrôle.

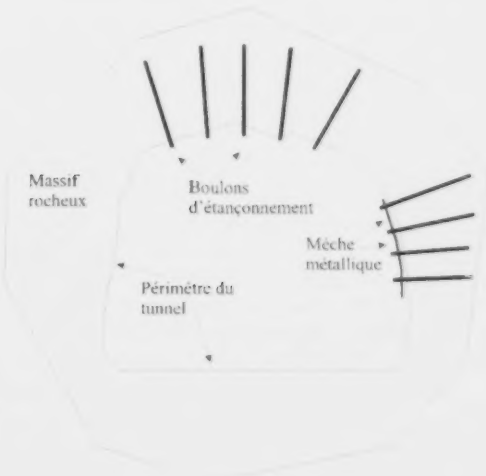


Figure 1.1: Illustration des boulons d'étançonnement et du treillis métallique de rétention.

Malgré les avantages marqués de cette méthode, il faut noter aussi quelques inconvénients. Le béton projeté dans certains cas, peut couvrir complètement le périmètre du tunnel. Il est clair que certains problèmes potentiels sont cachés en dessous de la couche de béton projeté. Il est aussi important de s'assurer qu'il y aura une épaisseur adéquate de protection. Il devient donc difficile de déterminer avec certitude l'épaisseur appliquée en raison de la surface irrégulière des parois. De plus, l'application du béton projeté peut se faire à distance, à l'aide d'une télécommande. Le forage est la seule méthode disponible pour déterminer l'épaisseur du béton projeté. Il est évident qu'on ne peut pas forer à fréquence

élevée. Donc, seulement quelques forages sont pris pour représenter l'ensemble des travaux effectués. Ce type d'étude donne une idée très approximative de l'épaisseur du béton projeté. La figure 1.2 illustre le problème de la variation de l'épaisseur de la couche de béton projeté.

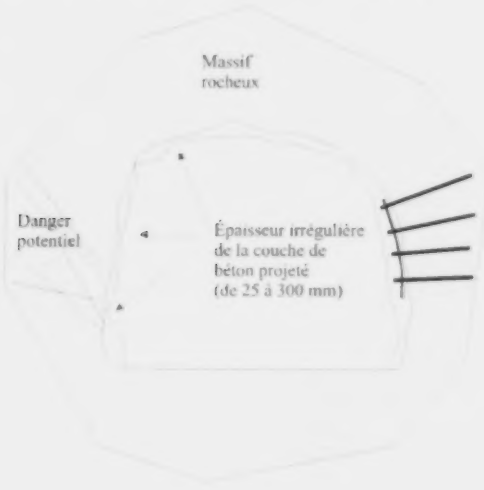


Figure 1.2: Illustration de l'application du béton projeté dans les mines.

En résumé, le béton projeté est appliqué sur une surface très irrégulière, soit à la main, soit par une méthode de télécommande à distance et le système de contrôle de la qualité des travaux est limité à quelques échantillons. De plus, le béton projeté cache des problèmes potentiels et donne aux mineurs un sentiment de sécurité qui n'est peut-être pas réel. Donc, pour assurer la sécurité des mineurs il est important de montrer d'une façon concrète que la couche de béton projeté est d'une épaisseur adéquate sur une grande partie de sa superficie.

Les sections suivantes présentent les étapes de recherche et développement réalisées à ce jour qui se concentre sur la résolution des problèmes discutés précédemment.

1.2 Objectifs

Voici un résumé des objectifs visés par cette étude :

1. Développer une méthode novatrice permettant une évaluation précise, rapide et systématique de l'épaisseur du béton projeté en place.

2. Développer une nouvelle méthode d'analyse des données, mais basée sur des techniques existantes.

3. Augmenter l'efficacité des inspections des parois de béton projeté par le personnel (réduction du facteur d'estimation de l'épaisseur).

4. Identifier l'absence d'adhérence entre le béton projeté et la roche.

5. Évaluer précisément, rapidement, et systématiquement les propriétés du béton projeté afin de localiser des endroits potentiellement problématiques et susceptibles d'effondrement.

1.3 Organisation du rapport

La deuxième section de ce rapport présente les principes de base ainsi que l'analyse des données de la méthode *MSR Impact-Écho*.

La troisième section est axée sur l'instrumentation de la méthode d'auscultation non destructive *MSR Impact-Écho* laquelle forme la base du système d'évaluation prévue pour l'étude des parois en béton projeté.

La quatrième section présente les essais en laboratoire effectués dans le but de développer d'avantage le système d'auscultation. Ici, l'accent est mis sur la détection de différentes épaisseurs de béton projeté telles qu'observées dans les mines ainsi que la détermination de ses propriétés mécaniques.

La section suivante présente l'usage de cette technologie dans différentes industries. Plus précisément nous présentons l'application de cette technologie dans une mine souterraine, le tunnel de métro de Montréal et les bassins d'électrolyte des affineries. Cette section est suivie par de conclusions et des recommandations pour des travaux à effectuer dans le but d'améliorer le système *MSR Impact-Écho*.

Finalement, l'annexe A présente une revue de la littérature centrée sur les méthodes non destructives mises à la disposition des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens.

2.0 REVUE DE LA LITTERATURE

Pour assurer un contrôle de la qualité du béton ou du béton projeté sans l'endommager, il convient d'utiliser des méthodes non destructives. Ces méthodes sont divisées en deux catégories générales: (1) celles qui sont capables d'estimer la résistance, la durabilité, la dureté, la qualité et les propriétés élastiques; (2) celles qui sont capables de détecter et de localiser des anomalies ainsi que de déterminer l'épaisseur d'une couche de béton projeté et/ou la nature de son adhérence au roc. Cette section passe en revue la méthode *MSR Impact-Écho* utilisée dans le cadre de ce projet pour mesurer l'épaisseur du béton projeté. L'annexe A de ce rapport décrit brièvement les méthodes d'inspection non destructives présentement utilisées par les institutions de recherche et par l'industrie. La figure 2.1 présente une vue globale des fonctions principales de chaque méthode non destructive.

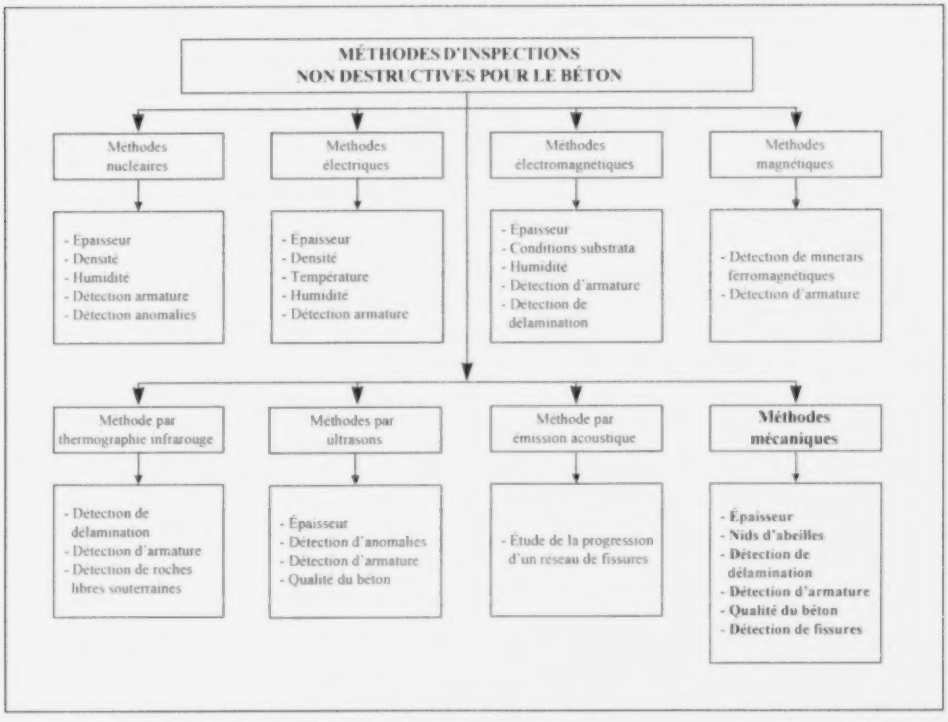


Figure 2.1: Fonctions principales des méthodes non destructives pour le béton.

2.1 La méthode *MSR Impact-Écho*

Les travaux de recherches à l'Université McGill ont démontré le potentiel du système *MSR Impact-Écho*, comparé aux méthodes précédentes, pour détecter et localiser avec précision les fissures, les délaminations et les vides dans le béton. L'attrait de ce système réside dans le fait qu'elle est une méthode entièrement non destructive, qu'elle peut détecter et localiser les fissures avec une très grande précision, qu'elle est rapide et facile à utiliser et enfin elle peut fournir une image détaillée de l'ensemble de la structure en termes de ses propriétés élastiques et de sa résistance. Cette technique est basée sur l'étude d'ondes microsismiques.

L'utilisation d'un impact pour produire une onde n'est pas une idée nouvelle. Un impact mécanique évite le besoin de se procurer un transducteur à émission d'ondes de grandes dimensions (voir les méthodes à ultrasons). Toutefois, l'onde de contrainte générée par un impact possède une direction moins précise que l'onde émise par un émetteur à grand diamètre. L'onde se propage dans toutes les directions sous la forme d'hémisphères et crée des réflexions arbitraires. C'est d'ailleurs pour cette raison que les méthodes par impacts sont utilisées sur des structures telles que des pieux. La géométrie de ces structures présente l'avantage de réduire les réflexions et la perte de signal.

Principes de base

Une pulsation (onde) est introduite à l'intérieur d'un spécimen en béton par le biais d'une source d'impact d'origine mécanique. L'onde de contrainte se propage alors dans le matériau sous la forme d'un train d'ondes hémisphériques. Ces ondes s'appellent des ondes de front. Les ondes de front sont constituées à la fois d'ondes de compression et de cisaillement. Les ondes de compression et de cisaillement sont reflétées par les interfaces internes du matériau et les bornes du spécimen. Ces ondes sont par la suite reflétées en forme d'écho à la surface où l'impact est produit. Les échos produisent des déplacements à la surface qui sont captées par un récepteur et ensuite enregistrés sur un oscilloscope digital. L'oscilloscope enregistre les trois formes d'ondes discutées précédemment. L'onde Rayleigh produit toujours un signal d'une amplitude plus grande que les ondes de compression et de cisaillement grâce à des mouvements elliptiques de surface. Toutefois, ces ondes ne sont pas considérées dans l'analyse *MSR Impact-Écho* à cause de leur faible pénétration en profondeur. L'onde de compression fait partie de l'information captée par le récepteur telle que vue à la figure 2.2.

Analyse des données

La méthode d'analyse des données par l'étude des fréquences est un développement majeur du système *MSR Impact-Écho*. Les ondes de compression sont produites par un impact et subissent des réflexions multiples entre la surface d'essai et l'interface de réflexion. Chaque fois que l'onde de compression arrive à la surface, celle-ci produit un déplacement qui est une caractéristique de l'amplitude de la réflexion. Donc, l'onde de propagation possède une caractéristique périodique; la fréquence (f) dont la définition algébrique est donnée par l'équation 1:

$$f = \frac{C_p}{2D} \quad \text{(Hz)} \tag{2.1}$$

où Cp = Vitesse de l'onde de compression (m/s)
D = Profondeur de l'interface de réflexion (m)

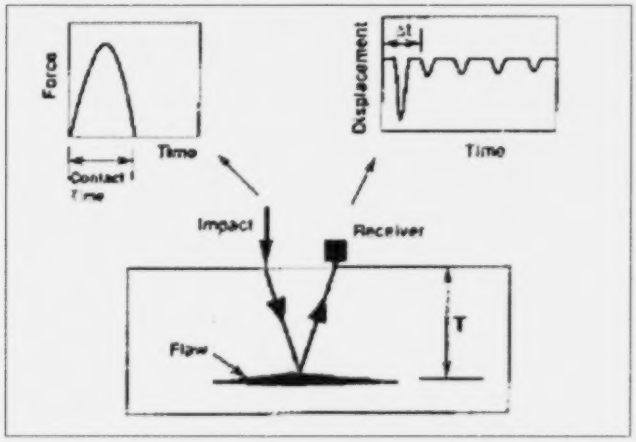


Figure 2.2: Principe de la méthode *MSR Impact-Écho*.

L'onde de compression ou de cisaillement captée par l'oscilloscope est transformée du domaine de temps au domaine de fréquence. La transformation s'effectue à l'aide du transformé de Fourier (FFT). Le spectre des amplitudes de fréquences captées par le récepteur permet, grâce à cette méthode d'analyse, d'identifier les fréquences dominantes de l'onde de compression et de ces échos. Pour des dalles en béton, la fréquence qui détermine l'épaisseur d'un spécimen est souvent celle qui est dominante dans le spectre. Cette valeur est par exemple utilisée pour calculer la profondeur d'une anomalie en utilisant l'équation 1. La figure 2.3 illustre cette explication.

Le temps de contact

La durée de contact entre le spécimen et la source d'impact est un aspect clé de la méthode *MSR Impact-Écho*. En effet, le temps de contact détermine le contenu fréquentiel du train d'onde généré par la source d'impact. Ceci implique que le temps de contact sur la surface détermine les dimensions, de même que la profondeur des défauts qui peuvent être observées sous la surface. Plus le temps de contact est court, plus le contenu fréquentiel de l'onde est caractérisé par des composantes de fréquences élevées (faibles longueurs d'ondes). Il est ainsi plus facile de détecter des défauts de faibles envergures de même que des anomalies localisées très près de la surface de contact. Pour ces raisons, il est recommandé d'utiliser un temps de contact court pour les essais sur dalles de béton. À première vue, la composante fréquentielle la plus élevée (f_{max}), ayant une forte amplitude dans le train d'onde, est équivalente à l'inverse du temps de contact. Par exemple, un temps de contact de 100 µs est équivalent à une fréquence maximale d'environ 10 kHz.

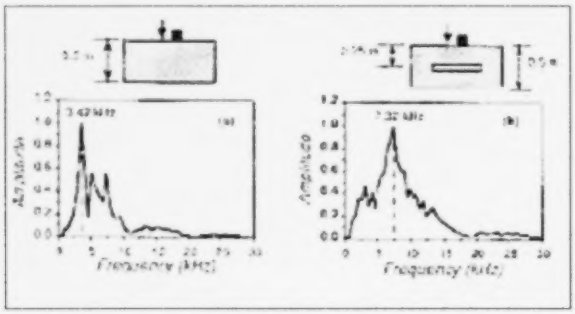


Figure 2.3: Exemples de spectres d'amplitudes et la détection d'une fissure.

Les sources d'impacts ont des formes variées, mais les plus populaires prennent la forme de marteaux ou de sphères d'acier. Les marteaux produisent des énergies d'impact élevées dû au temps de contact long (> 1 ms) sur la surface. Ce temps de contact est utilisé sur des structures élancées en béton, mais n'est pas acceptable pour des structures telles que des dalles et autres structures moins élancées. En utilisant des sphères ou des sources d'impacts à ressort et à bouts sphériques, des temps de contacts de 20 à 60 µs peuvent être générés. Les sphères d'impacts possèdent un avantage important sur le marteau; le temps de contact est directement proportionnel au diamètre de la sphère. Cette simplicité et versatilité expliquent ainsi la popularité de cette méthode auprès des chercheurs.

La technique *MSR Impact-Écho* possède plusieurs capacités, dont celle de déterminer les propriétés dynamiques du béton. Les propriétés dynamiques en question sont le module d'élasticité et le rapport de Poisson, soit deux paramètres d'importance dans l'étude des structures en béton. Le tout peut maintenant se réaliser en auscultant une seule surface d'une structure. Notons que les équipements ultrasons développés jusqu'à présent (voir annexe A) mesurent l'épaisseur du béton seulement.

Une particularité de la technique *MSR Impact-Écho* est l'étude de deux formes d'ondes, soit les ondes de compression et les ondes de cisaillement. En combinant les fréquences de réflexion de ces deux ondes, on peut déterminer les propriétés dynamiques du béton [Hassani et col., 1997]. Il a fallu plus de quatre (4) ans de développement et d'essais pour aboutir à cette technique d'évaluation non destructive. La figure 2.4 illustre schématiquement le concept de la méthode *MSR Impact-Écho*.

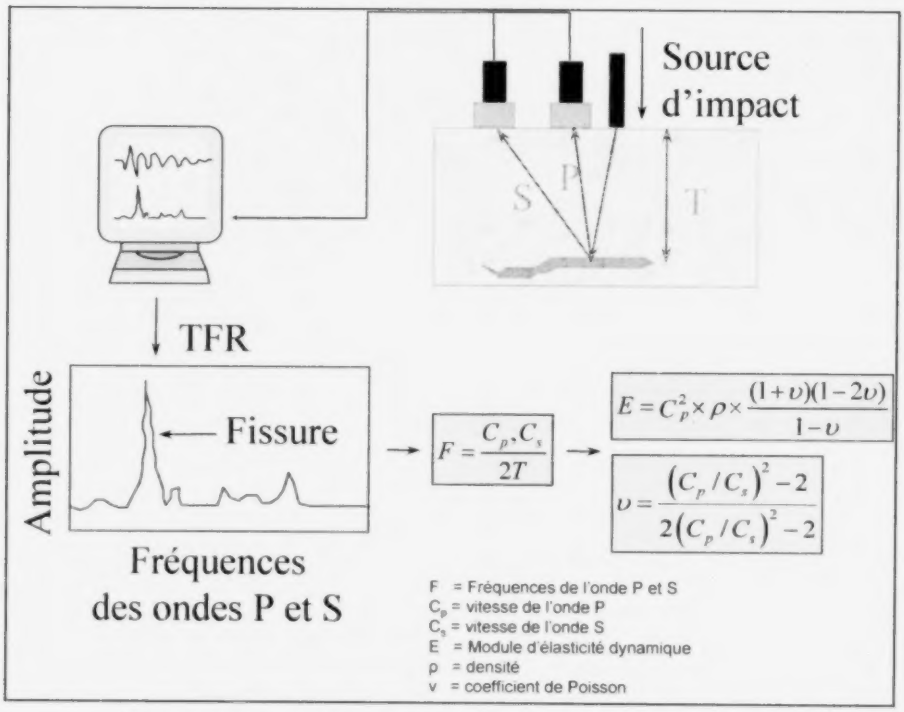


Figure 2.4: Vue schématique de la méthode *MSR Impact-Écho.*

3.0 INSTRUMENTATION

Le système *MSR Impact-Écho* utilisé pour ces expériences fut construit par le laboratoire d'auscultation non destructive de l'Université McGill. D'ailleurs, les auteurs détiennent un brevet sur cet appareil enregistré au Canada et aux États-Unis. Il faut noter que le système breveté est principalement conçu pour l'auscultation d'éléments en béton ayant plus de 150 mm d'épaisseur. Ce programme de recherche a pour objectif de réduire cette limite inférieure à moins de 150 mm.

Le système type comprend deux capteurs à large bande, sensibles aux mouvements normaux et parallèles au point d'essai. Les capteurs sont jumelés à un amplificateur. Vient s'ajouter une série de sources d'impacts ayant des pointes sphériques de différents diamètres. Le tout est raccordé à un système d'acquisition de données. La figure ci-dessous montre la deuxième génération des capteurs du système *MSR Impact-Écho*.

Figure 3.1: Deuxième génération des capteurs du système *MSR Impact-Écho*.

Les essais en laboratoire et dans la mine Stobie d'Inco à Sudbury furent effectués à l'aide de ces capteurs. Ce dispositif est assez grand et lourd pour une utilisation routinière de l'appareil. Les auteurs de ce rapport ont conçu une troisième génération de capteurs pour le système *MSR Impact-Écho*. Ces nouveaux capteurs sont beaucoup plus petits, légers et facile à manipuler. Ils ont été utilisés lors des essais dans le métro de Montréal et dans les affineries à l'est de Montréal. La figure 3.2 montre la troisième génération des capteurs du système *MSR Impact-Écho*.

Figure 3.2: Troisième génération des capteurs du système *MSR Impact-Écho*.

Le système comprend également un module de conditionnement de signal et un amplificateur, le tout alimenté par une pile rechargeable de 12 volts. Le conditionneur, l'amplificateur et la pile rechargeable ont été incorporés dans une même boite. La figure 3.5 montre ce montage.

La nouvelle version du système d'acquisition peut reconnaître un faux déclenchement ou un test manqué. Ainsi, le système peut avertir l'usager de reprendre un test. Cette option fait

gagner du temps durant la phase d'acquisition d'un projet, en éliminant le fait de s'assurer qu'un bon signal a été obtenu.

Le temps d'acquisition des données est relativement rapide. En général, les étapes à suivre lors de la collection des données sont l'application du couplant au point d'essai, la mise en place du transducteur et de la source d'impact, l'introduction de l'impact et finalement l'acquisition du signal par le système. Toutes ces étapes prennent en moyenne entre 30 et 60 secondes à effectuer. Si la surface du béton est trop rugueuse elle doit être polie (sur un diamètre de 10 cm) à l'aide d'une ponceuse pour béton.

Un couplant sert à créer un bon contact entre le capteur et la surface du béton projeté afin de collecter le maximum d'énergie emmagasinée dans le signal réfléchi. En général, tout gel ayant une viscosité plus élevée que l'eau peut être utilisé. Nous utilisons un gel industriel assez ferme que l'on peut se procurer facilement chez un quincaillier.

L'analyse des signaux se fait par l'entremise du logiciel « MSR Analysis Package V.2.1 » développé dans notre laboratoire. Le logiciel fonctionne sous le système d'exploitation GAUSS, un langage de programmation axé sur les calculs mathématiques avancés et les statistiques. La nouvelle version du logiciel (en cours de développement) permettra à l'usager de faire l'acquisition, d'afficher les signaux, d'analyser les données et de présenter le résultat des analyses en temps réel sous le système d'exploitation Windows. Les figures 3.3 et 3.4 montrent un signal typique obtenu avec le dernier capteur d'onde de compression ainsi que sa transformée de Fourier.

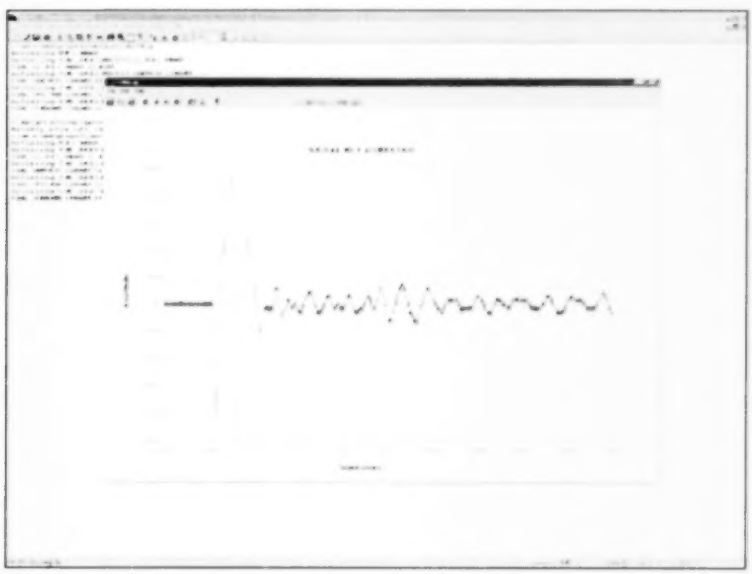


Figure 3.3: Signal caractéristique du système *MSR Impact-Écho*.

Figure 3.4: Transformée de Fourier du signal ci-dessus.

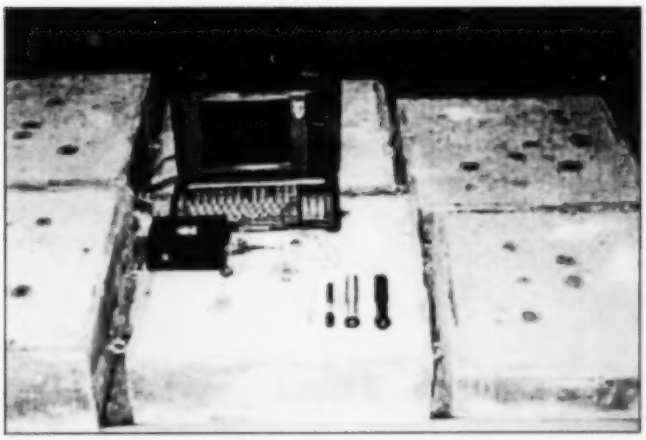


Figure 3.5: Système *MSR Impact-Écho* et les sources d'impact.

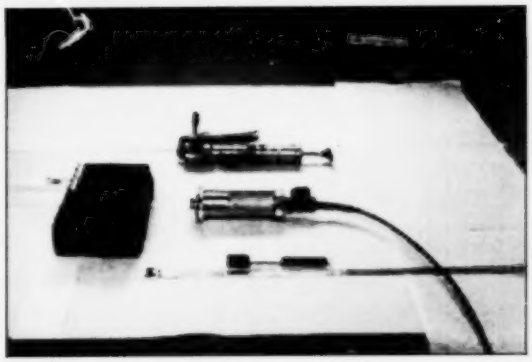


Figure 3.6: Système *MSR Impact-Écho*, le module comprenant le capteur et le conditionneur des signaux.

4.0 ESSAIS EN LABORATOIRE

Cette section du rapport présente les étapes d'une étude effectuée à l'université McGill par le laboratoire d'auscultation non destructive du département de génie des mines et de métallurgie. Afin de bien entamer ce programme de recherche, une évaluation des caractéristiques sismiques du béton projeté a été effectuée. L'objectif premier de cette étude était l'évaluation de la variation de la vitesse de propagation des ondes de compression et de cisaillement dans une composition de béton projeté avec et sans fibres métalliques tel qu'utilisé dans la plupart des applications souterraines.

4.1 Programme de recherche

Étant donné que la méthode d'auscultation *MSR Impact-Écho* requiert la connaissance de la vitesse moyenne de l'onde de compression et de cisaillement afin de déterminer avec précision l'épaisseur et les propriétés dynamiques des parois de béton projeté, une étude exhaustive a été effectuée pour évaluer précisément ces paramètres. En effet, des informations importantes ont été obtenues par les auteurs de ce rapport au sujet de la formulation du mélange du béton projeté utilisée dans les mines. Ce mélange a été utilisé pour les essais présentés ci-dessous.

Les essais ont été effectués sur huit (8) dalles de béton projeté qui ont été fabriquées avec l'aide d'une firme spécialisée. L'épaisseur des dalles varie et de plus, elles sont divisées en deux catégories, soit une série de dalles fabriquées avec du béton projeté type et l'autre série avec du béton projeté contenant des fibres métalliques qui servent à augmenter sa résistance en traction.

Les essais pour déterminer les propriétés dynamiques du béton projeté ont été réalisés à la fin du projet afin de permettre le prélèvement des carottes pour effectuer des essais statiques. Ainsi, nous avons pu comparer les résultats obtenus avec le système *MSR Impact-Écho* avec les résultats des essais en compression.

Afin de déterminer la faisabilité de la méthode *MSR Impact-Écho* quant à la détermination de l'épaisseur d'une couche de béton projeté, il est important d'évaluer le critère d'impédance acoustique du matériau. Ceci permet d'envisager qu'elle sera la probabilité d'intercepter une interface béton projeté/roc.

4.2 Développement expérimental

Les échantillons mis à l'essai consistent en huit dalles de béton projeté. Une série de quatre dalles ont été fabriquées avec du béton projeté type et l'autre série de quatre moules ont été injectés avec du béton projeté auquel fut ajouté des fibres métalliques. Afin d'évaluer et d'optimiser le système *MSR Impact-Écho* pour l'auscultation d'épaisseurs minces, les dalles ont été conçues avec des épaisseurs qui varient de 50,8 mm (2'') à 203,2 mm (8''). L'aire de chaque dalle est de 0,372 m^2 (2'x2') ce qui est suffisant pour permettre le ponçage d'une partie de la surface; l'autre partie étant maintenue à sa condition originale après la projection du béton projeté. Les dimensions des dalles ont été choisies en fonction de limiter les effets qu'auront les côtés sur la propagation des ondes. Tous les essais ont été effectués près du centre des dalles autant sur la surface poncée que sur la surface originale.

Le tableau 4.1 montre les proportions des constituants du mélange et le lieu d'origine des matières premières. La projection du béton dans les moules a suivi les procédures normales d'application et ce par des ouvriers accrédités. La résistance minimale en compression a été évaluée comme étant 35 MPa après 28 jours de cure. La densité du mélange est 2200 kg/m^3 et la teneur en air est de 5% tel que déterminée sur le site de projection en suivant la norme ASTM C231-97.

Tableau 4.1: Composantes du mélange de béton projeté.

Matériau	Type	Quantité (par m^3)	Fournisseur	Région
Granulats	2,5 – 10 mm	490 kg	Les Sables LG	St-Hypolite
Ciment	10FS	450 kg	Lafarge Inc.	St-Gabriel
Sable	5-80	1100 kg	Francon Inc.	St-Constant
Super plastifiant	MB AE 90	380 ml	Master Builder	------
Eau		180 kg	------	Laval
Fibres	NOVOCON	45 4g	Groupe Lefebvre	------

Afin d'évaluer les changements de vitesses de propagation d'ondes de contraintes, les dalles de béton ont été auscultées à des intervalles de 7 jours à partir de la 7^{ième} journée de cure. Tel que discuté précédemment, chaque dalle possède une section de surface finie à la truelle et une section de surface non finie telle qu'elle se trouve dans les mines. Les essais ont été effectués sur les deux types de surfaces de chaque dalle. Le taux d'échantillonnage des signaux a été fixé à 200 kHz (5 µs). Chaque signal était composé de 4096 échantillons. Les essais ont évalué trois sources d'impacts mécaniques, chacune ayant une pointe sphérique de diamètre différent et unique. Chaque source d'impacts produit une gamme de fréquence différente. C'est-à-dire, plus le diamètre de la pointe sphérique est petit, plus grande sera la gamme de fréquence. En théorie, à énergie égale, la source d'impact avec la plus grande gamme de fréquence (le diamètre de la pointe le plus petit) devrait produire des résultats les plus précis pour le béton projeté. Ces essais ont été effectués pour confirmer cette hypothèse.

Chaque dalle a été dotée de six zones d'essais, trois sur la surface lisse et trois sur la surface rugueuse. À chaque point d'essai, cinq signaux ont été captés pour un total de 960 essais. La figure 4.1 montre le profile des huit dalles soumises aux essais *MSR Impact-Écho*. L'épaisseur de chaque dalle est clairement montrée sur cette figure.

Les positions ayant une tache blanche indique des points où il a été nécessaire d'effectuer un certain niveau de préparation de surface afin d'assurer un contact adéquat pour le capteur. Les zones d'auscultation foncés indiquent l'utilisation d'un matériau qui sert de couplant lors des essais sur la surface rugueuse et polie. Le couplant est une graisse industrielle de haute performance, ce qui signifie qu'elle garde sa viscosité dans une température extrême. Ce couplant est disponible dans plusieurs commerces de l'automobile nationaux et le prix est très modique. Les dalles de béton projeté contenant des fibres métalliques se trouvent derrière les premières dalles montrées à la figure 4.1. La figure 4.2 offre un meilleur aperçu d'une surface type des dalles auscultées.

Figure 4.1: Les huit dalles soumises aux essais *MSR Impact-Écho*.

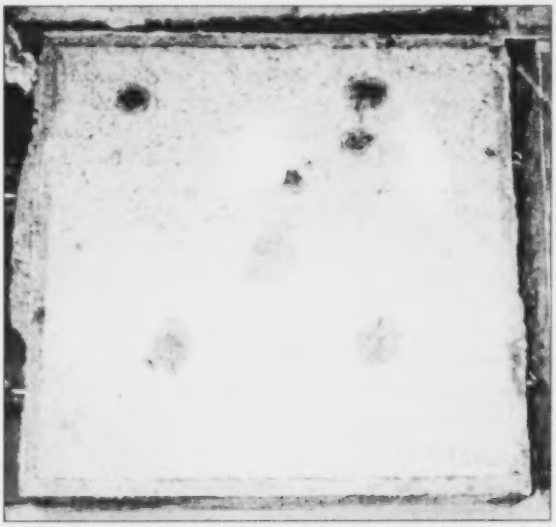


Figure 4.2: Vue de dessus d'une des dalles montrant les deux types de surfaces auscultés. Les zones noires sont des positions d'auscultation.

4.3 Résultats et discussion

Les données présentées dans cette section se concentrent sur les résultats obtenus avec trois sources d'impact. Ces sources d'impact possèdent tous des critères mécaniques différents qui influencent la forme des ondes générées. Les résultats ont été obtenus sur les huit dalles mentionnées ci-dessus. La figure 4.3 présente un signal type enregistré par le système d'acquisition et analysé dans la gamme de fréquence propre au signal. Il est opportun de signaler

la faible quantité de bruit dans le signal et l'oscillation sinusoïdale présente. Ce mouvement représente l'oscillation des particules directement sous le capteur dû aux multiples réflexions des ondes primaires qui se propagent dans la dalle suite à l'impulsion. La transformé de Fourrier montre clairement que la fréquence de réflexion de l'onde de compression est détectable. Il est à noter que le signal de la figure 4.3 a été obtenu sur la dalle de 50,2 mm (2'') sans fibres métalliques. La fréquence de réflexion de l'onde de compression est de 33540 Hz, ce qui équivaut à une épaisseur de 59 mm pour une vitesse de 4000 m/s. Cette figure est représentative de la plupart des résultats obtenus sur cette dalle.

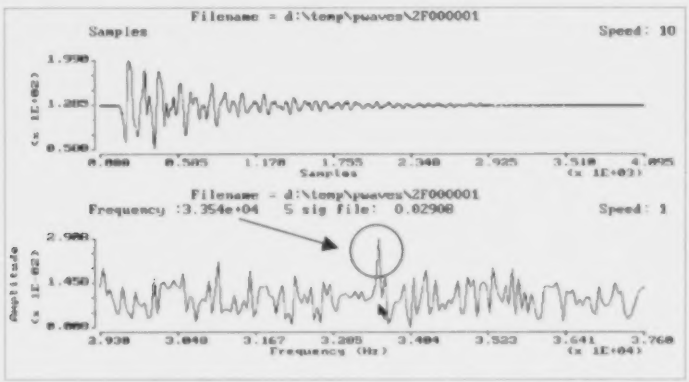


Figure 4.3: Signal enregistré provenant de la surface rugueuse d'une dalle de béton.

L'épaisseur moyenne des dalles a été mesurée par des pinces. Pour les quatre dalles, l'épaisseur mesurée est égale à 50,2, 101,2, 158,3 et 209,1 mm.

Les résultats ont été cueillis sur une période de 28 jours. Les résultats confirment une tendance à la hausse de la vitesse de l'onde de compression au cours de cette période. Lorsque la résistance en compression du béton projeté atteint presque 90% de sa capacité maximale, la vitesse de propagation des ondes de compression devient stable.

La figure 4.4 montre la variation des vitesses de propagation des ondes en fonction du temps de cure pour les essais effectués avec la source d'impact à bout sphérique de 3 mm de diamètre. Il faut noter que les résultats à chaque point dans cette figure sont la moyenne de 15 essais. Les figures 4.4 (a), (b), (c) et (d) sont différentiées par le type de béton projeté (avec ou sans fibres métalliques) et la surface d'essais. Les résultats de la figure 4.4 montrent une hausse de la vitesse de propagation des ondes de compression avec le temps. Cela est dû à l'hydratation du ciment qui contribue à augmenter la résistance du matériau et à l'élimination de l'eau libre dans le mélange. Ceci contribue grandement à la faiblesse des vitesses de propagation observées dans les premiers jours d'essais. Ces résultats établissent clairement aussi qu'il existe une différence marquée entre les vitesses de propagation des ondes primaires qui traversent le béton projeté avec ou sans fibres à 28 jours de cure.

La figure 4.5 illustre les résultats obtenus à l'aide d'une source d'impact ayant une pointe de contact de 2 mm de diamètre. En général, ces résultats confirment les mêmes tendances que celles présentées à la figure 4.4. Cependant, la figure 4.5 (d) montre une anomalie aux essais de 21 jours effectués sur la dalle de 0,050 m d'épaisseur n'ayant pas de fibres métalliques. Il est

toujours impossible de déterminer la cause de cette grande variation de la vitesse des ondes de compression entre essais du jour 14 et du jour 28.

La figure 4.6 présente les résultats obtenus à l'aide d'une source d'impact mécanique ayant une pointe de 1.3 mm de diamètre. Cette source d'ondes permet d'introduire des ondes dans la masse de béton qui possèdent des longueurs d'ondes inférieures à celles produites par la source d'impact à bout sphérique de 2,0 mm. On peut noter que la vitesse des ondes de compression varie seulement de 250 m/s entre des essais effectués sur quatre dalles ayant du béton projeté similaire et sur les mêmes surfaces.

Suite à l'analyse de tous les essais effectués au 28^{ième} jour de cure, les données indiquent une vitesse moyenne des ondes de compressions d'environ 4019 m/s dans les dalles en béton projeté avec fibres. Cette valeur provient de 360 essais effectués ce même jour et génère un écart type de 204 m/s. La valeur maximale et minimale obtenue était 4217 m/s et 3637 m/s respectivement. Dans le cas du béton projeté sans fibres la vitesse moyenne des ondes de compression est d'environ 3677 m/s au 28^{ième} jour de cure et pour le même nombre d'essais. L'écart type de ces essais ce situe à 145 m/s. La valeur maximale et minimale obtenue était 3987 m/s et 3056 m/s respectivement.

L'écart type des résultats est due en partie au calcul de la moyenne des vitesses obtenues avec les trois sources d'impact. Si on n'utilise que les valeurs obtenues avec la source d'impact ayant un diamètre de 1.3 mm, on obtiendrait une moyenne de 4023 m/s pour le béton projeté avec fibres. L'écart type dans ce cas serait de 150 m/s. En ce qui concerne le béton projeté sans fibres, la vitesse moyenne serait de 3682 m/s avec un écart type de 91 m/s. En outre, il a été observé que plus une surface est mieux préparée moins est l'erreur dans le calcul de la vitesse.

Il est important de calibrer le système avant de commencer l'acquisition des signaux dans un chantier. Dans le cas où il serait impossible de calibrer le système, la connaissance de la vitesse moyenne est extrêmement utile.

À titre de comparaison, un béton à poids normal ayant une densité de 2350 kg/m3 et un rapport de Poisson de 0,2 possède une vitesse de propagation de l'ordre de 4000 m/s. Il est toutefois essentiel de noter que la vitesse de propagation dans un béton projeté varie en fonction du mélange, des méthodes de projection et la méthode de la cure. La présence de treillis métalliques dans la couche de béton projeté n'a pas une influence significative sur la vitesse des ondes puisque la longueur d'onde de la source d'impact est plus grande que le diamètre des barres d'armature, donc les ondes de compression et de cisaillement traversent le béton sans être affectées par ces dernières.

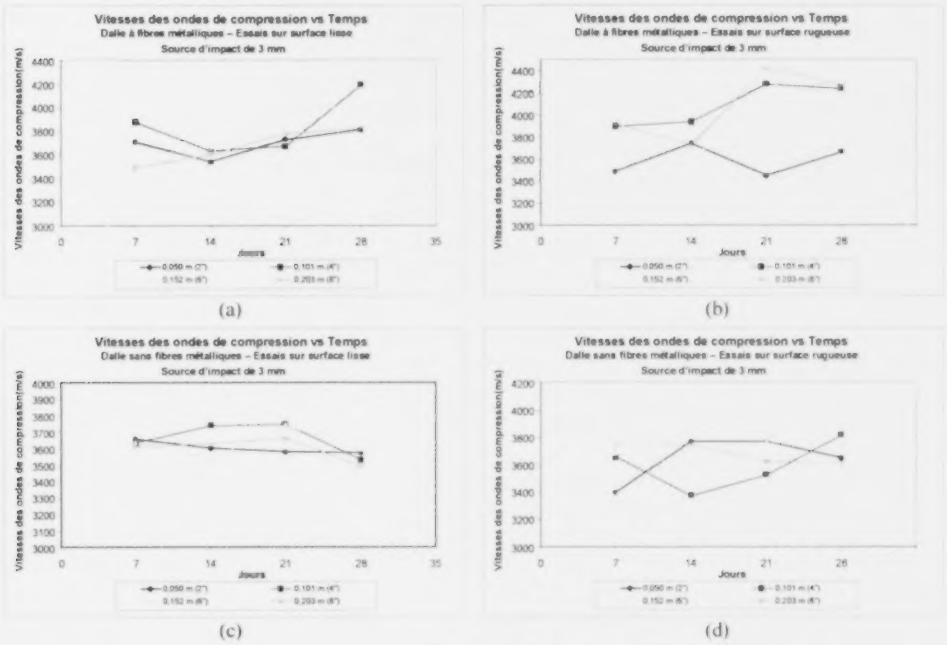


Figure 4.4: Vitesses des ondes de compression obtenues avec la source d'impact à bout sphérique de 3 mm de diamètre.

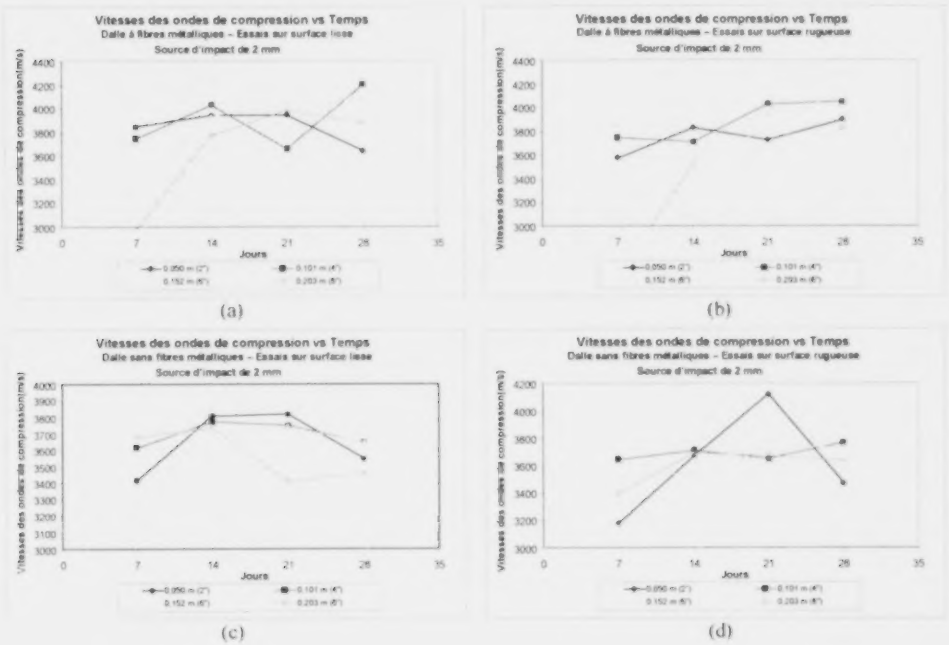


Figure 4.5: Vitesses des ondes de compression obtenues avec la source de 2 mm.

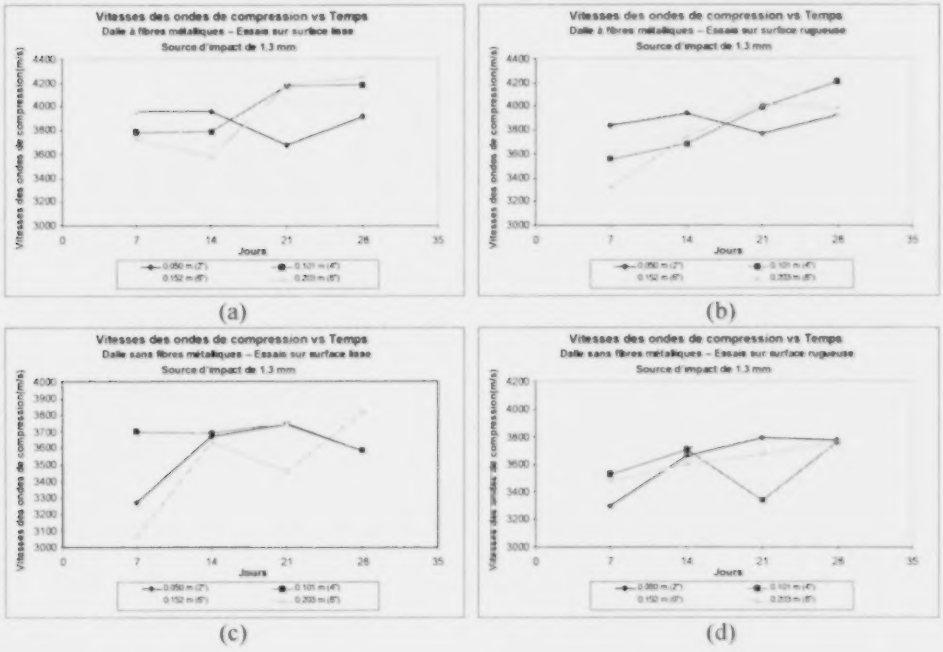


Figure 4.6: Vitesses des ondes de compression obtenues avec la source de 1.3 mm.

4.4 Mesure des propriétés dynamiques du béton projeté

La vitesse de l'onde de cisaillement dans le béton projeté a été mesurée dans les huit dalles en utilisant la source d'impact de 1.3 mm de diamètre et le capteur de cisaillement. Cette vitesse a servi à calculer les propriétés mécaniques du béton projeté (voir Hassani et coll. 1997). Le tableau 4.2 présente, des valeurs de la vitesse de l'onde de cisaillement, obtenues avec le système *MSR Impact-Écho*.

Tableau 4.2: Vitesse de l'onde de compression et de cisaillement dans les dalles de béton projeté.

Épaisseurs des dalles (m)	Béton projeté avec fibres métalliques		Béton projeté sans fibres métalliques	
	Vitesses des ondes de compression (m/s)	Vitesses des ondes de cisaillement (m/s)	Vitesses des ondes de compression (m/s)	Vitesses des ondes de cisaillement (m/s)
0.050	3737	2221	3613	2199
0.101	4217	2535	3674	2209
0.152	4095	2485	3887	2327
0.203	4044	2418	3556	2161

Les trois dalles les plus épaisses, soient celles à 0,101, 0,158 et 0,209 m, ont été carottées et au total 18 échantillons ont été préparés pour effectuer des essais à compression simple afin de déterminer le module d'élasticité et le rapport de Poisson. Trois échantillons avec fibres métalliques et trois échantillons sans fibres métalliques provenant de chaque dalle ont été testés. Les carottes avaient un diamètre de 5.1 cm (2''). Le tableau 4.3 présente les résultats comparatifs de ces essais avec les valeurs dynamiques obtenues avec le système *MSR Impact-Écho*.

Tableau 4.3: Propriétés mécaniques dynamiques et statiques du béton projeté avec fibres métalliques.

Épaisseurs des dalles (m)	Essais *MSR Impact-Écho*		Essais à compression simple	
	Module d'élasticité (GPa)	Rapport de Poisson	Module d'élasticité (GPa)	Rapport de Poisson
0.050	26.62	0.23		
0.101	34.42	0.22	39.1±4	0.23±0.02
0.152	32.83	0.21	38.0±2	0.22±0.02
0.203	31.42	0.22	40.1±2	0.21±0.03

Tableau 4.4: Propriétés mécaniques dynamiques et statiques du béton projeté sans fibres métalliques.

Épaisseurs des dalles (m)	Essais *MSR Impact-Écho*		Essais à compression simple	
	Module d'élasticité (GPa)	Rapport de Poisson	Module d'élasticité (GPa)	Rapport de Poisson
0.050	25.66	0.21		
0.101	26.12	0.22	34.6±3	0.25±0.02
0.152	29.08	0.22	35.2±4	0.22±0.02
0.203	24.81	0.21	32.1±2	0.23±0.02

4.5 Mesure de l'impédance acoustique du béton projeté

La mesure de l'impédance acoustique d'un matériau tel que le béton projeté est essentielle car il est important de déterminer le coefficient de réflexion d'une onde qui intercepte une interface entre celui-ci et un autre matériau tel que le roc. Si les deux impédances acoustiques sont quasi identiques, il devient difficile de capter les vibrations venant du va et vient des ondes de compression entre le point d'acquisition et l'interface des deux matériaux. L'impédance acoustique est une valeur calculée à l'aide de la vitesse de propagation des ondes utilisant la formule ci-dessous:

$$Z = \rho \times C_P \tag{4.1}$$

À titre de comparaison, le tableau 4.5 présente des valeurs d'impédance acoustique type de certains matériaux bien connus. L'impédance acoustique d'un béton à poids normal varie de 6.9 à 10.4.

Tableau 4.5: Impédance acoustique de certains matériaux (Carino et Sansalone, 1984).

Matériau	Densité (ρ - kg/m^3)	Vitesse d'onde P (C_p - m/s)	Impédance Acoustique (kg/m^{2}s × 10^6)
Béton	2350	3000-5000	6.9-10.4
Acier	7850	5940	46.6
Granite	2750	5500-6100	15.1-16.8
Marbre	2650	3700-6900	9.8-18.3
Quartz	2620	200-2000	0.28-4.3

Le tableau 4.6 présente un résumé des impédances acoustiques observées sur toutes les dalles de cette auscultation. Les résultats montrent que le béton projeté possède une impédance acoustique parfois légèrement plus petite que 7×10^6 kg/m^{2}s et parfois plus grand que 9×10^6 kg/m^{2}s. Le coefficient de réflexion est calculé utilisant la formule ci-dessous et varie approximativement de 0.25 à 0.41 ce qui est suffisant pour faire la détection des interfaces béton projeté/granite.

$$R_c = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{4.2}$$

Tableau 4.6: Impédance acoustique des dalles de béton projeté.

Épaisseurs des dalles (m)	Béton projeté avec fibres métalliques		Béton projeté sans fibres métalliques	
	Vitesse moyenne de l'onde de compression (m/s)	Impédance acoustique (kg/m^{2}s × 10^6)	Vitesse moyenne de l'onde de compression (m/s)	Impédance Acoustique (kg/m^{2}s × 10^6)
0.050	3737	8.22	3613	7.95
0.101	4217	9.28	3674	8.08
0.152	4095	9.01	3887	8.55
0.203	4044	8.90	3556	7.82

4.6 Sommaire

Les essais en laboratoire ont eu pour objectif de quantifier la vitesse de propagation des ondes de compressions et de cisaillement dans deux types de matériaux: le béton projeté de type NOVOCON® avec et sans fibres métalliques. Ces essais ont permis d'identifier, pour le béton projeté avec fibre une vitesse moyenne d'ondes de compression et de cisaillement de 4020 m/s et 2415 m/s respectivement pour le béton projeté avec fibres et 3680 m/s et 2224 m/s, respectivement pour le béton projeté sans fibre.

Ces essais ont montré qu'avec la deuxième génération du système *MSR Impact-Écho*, il est possible de mesurer des épaisseurs supérieures à 50 mm.

Les valeurs du module d'élasticité obtenues par des essais à compression simple sont en moyenne entre 12% et 25% supérieures aux valeurs dynamiques. D'autres chercheurs tels que Skazlic, M. *et col.*, 2003 rapportent une différence entre les essais statiques et dynamiques (appareil ultrasons) de l'ordre de 50% pour le béton projeté. Malhotra, V.M. et Sivasundaram, V. 2004 ont établit une différence de ± 10% à 15% pour un béton de haute résistance. En ce qui concerne le rapport du Poisson, nous avons trouvé des résultats comparables entre les essais statiques et dynamiques, c'est-à-dire une variation allant de 0% à 12%. Ces résultats nous permettent d'envisager l'utilisation de la méthode *MSR Impact-Écho* pour l'évaluation de la qualité du béton projeté.

Les travaux de recherche en laboratoire ont aussi permis de déterminer que l'impédance acoustique du béton projeté diffère suffisamment de celle d'une masse rocheuse tel que le granite. Ceci permet de conclure qu'on pourrait obtenir une réflexion adéquate de l'onde de compression.

5.0 ESSAIS EN CHANTIER

Cette section présente plusieurs essais effectués en chantier. Dans le premier cas, les travaux sont divisés en deux volets qui représentent des essais in situ avec la deuxième génération du système *MSR Impact-Écho* et ensuite des essais avec une troisième génération d'équipement qui vise la miniaturisation du système. La deuxième et troisième étude de cas concerne l'application de la technologie développée à d'autres domaines tels que la détermination de la qualité du béton synthétique dans les bassins d'électrolyse dans les affineries et la localisation des conduits d'électricité dans du béton dans le métro de Montréal.

5.1 Premier essai dans une mine souterraine

Cette section présente des résultats obtenus lors d'une étude préliminaire sur la faisabilité d'utiliser la méthode *MSR Impact-Écho* comme outil de diagnostique pour l'auscultation des parois en béton projeté qui se trouvent dans une mine.

5.1.1 Programme de recherche

Un site d'essai dans la mine Stobie de la compagnie INCO à Sudbury, a été utilisé au préalable comme un endroit pour l'étude de différentes compositions de béton projeté. Trois endroits ont été identifiés et choisis comme lieu d'auscultation. Les responsables de la mine, qui nous ont accompagnés en tout temps afin d'assurer notre sécurité, nous ont signalé que les parois de béton projeté qui figurent dans cette auscultation sont composées avec et sans fibres métalliques. Sur les trois régions auscultées, deux sont sans fibres. Les positions des lieux d'essais ont été sélectionnées en fonction de la présence de forages. L'objectif était de comparer les résultats *MSR Impact-Écho* avec les épaisseurs des couches de béton projeté mesurés dans les trous de forages. Les carottes n'étaient pas disponibles. Le nombre des essais fut limité à cause des exigences des responsables de la mine et des besoins de production de celle-ci.

Afin de déterminer l'épaisseur des couches de béton projeté, trois lignes horizontales ont été tracées sur la paroi aux endroits présélectionnés. Sur chaque ligne, un trait vertical a été placé à un intervalle de 0,3048 m ou 1'. Une attention particulière a été portée au traçage des lignes afin de s'assurer qu'elles interceptent les trous de forages identifiés antérieurement. Le tableau 5.1 présente les épaisseurs mesurées dans les trous de forages avoisinant les lignes d'auscultation. Aux points 6, 20 et 45 deux mesures furent prises par trous de forage compte tenu d'une variance en épaisseur de la paroi. Aucune variation d'épaisseur n'a été observée dans les autres trous de forage. La position des forages se situe par rapport à leur position sur les lignes d'auscultation. La figure 5.1 montre la position des lignes d'auscultation et des forages au niveau de la galerie 3400. La deuxième et troisième ligne d'auscultation se situe dans une région où se trouve le béton projeté sans fibre métallique.

Le système d'acquisition a été réglé à un taux d'échantillonnage de 100 kHz (10 μs) et un total de 4096 d'échantillons a été acquis par signal. La résolution dans la gamme fréquentielle était de 24.4 Hz. Lors des essais il n'était pas possible de déterminer avec précision la vitesse des ondes de compression par voie de calibrage, donc une vitesse de 4000 m/s a alors été choisie car cette valeur est représentative de la vitesse d'onde de compression dans un béton à poids normal

de bonne qualité ayant un rapport de Poisson de 0.2. Cette approche est souvent utilisée lors d'auscultation in situ s'il est impossible de déterminer la vitesse d'onde de compression dans le milieu assujetti aux essais *MSR Impact-Écho*. À titre d'information, dans le béton la gamme de vitesses d'ondes de compression varie de 3000 m/s à 5000 m/s.

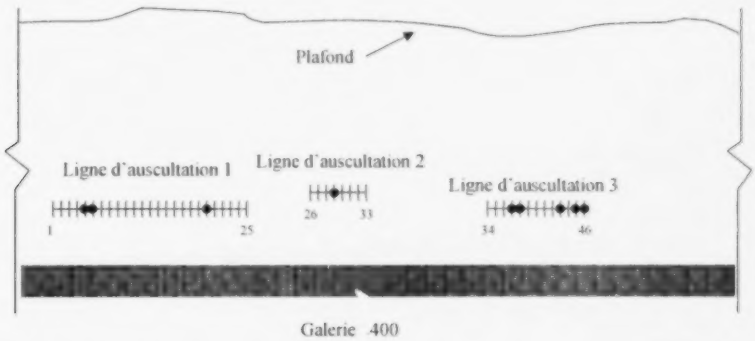


Figure 5.1: Vue schématique des lignes d'auscultation. Les points noirs indiquent la position des forages.

Tableau 5.1: Épaisseurs réelles de la paroi de béton projeté aux points noir indiqués dans la figure 5.1.

Ligne d'auscultation	Position	Mesures réelles des épaisseurs	Béton projeté avec fibres
1	5	101 mm (4")	Oui
1	6	165 mm (6.5") et 140 mm (5.5")	Oui
1	20	107 mm (4.25") et 114 mm (4.5")	Oui
2	29	25 mm (1")	Non
3	37	101 mm (4")	Non
3	38	101 mm (4")	Non
3	43	133 mm (5.25")	Non
3	45	88 mm (3.5") et 101 mm (4")	Non
3	46	64 mm (2.5")	Non

5.1.2 Résultats et discussions

Le capteur a été placé sur une surface plane à chaque point d'auscultation. Celui-ci fut orienté dans une direction normale à la surface du béton projeté. Le diamètre du point de contact du capteur était suffisamment petit (1.5 mm) pour assurer un bon contact sur la paroi du béton projeté. La surface de la paroi était plus lisse que celle représentée dans la partie supérieure de la figure 5.2.

Il faut noter que la surface du béton projeté était très sableuse. Elle s'écrase au contact du bout sphérique de la source d'impact. L'écrasement de la surface a pour effet d'augmenter le temps de contact du bout sphérique et résulte en une plus grande longueur d'onde générée à l'impact. Si la période de l'onde est supérieure à l'épaisseur de la paroi de béton projeté, cela engendre des difficultés quant à l'interprétation des résultats. Afin d'assurer une bonne acquisition des ondes, la surface du béton projeté a été poncée à l'aide d'une truelle avant l'essai. Ceci assure que le temps de contact a été réduit suffisamment pour réussir les essais. L'énergie totale de l'impact est donc distribuée sur une plus grande gamme de fréquences, ce qui inclue la fréquence de réflexion des ondes de compression. La figure 5.2 montre la position type du capteur vis-à-vis la source d'impact pour une auscultation par la méthode *MSR Impact-Écho*.

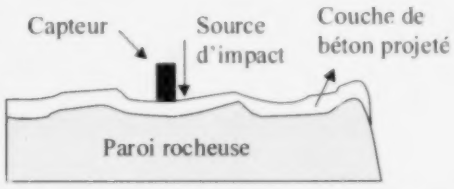


Figure 5.2: Position type du capteur et de la source d'impact sur une paroi de béton projeté.

Le tableau 5.2 présente les résultats obtenus suite à l'analyse des signaux captés aux points d'essais avoisinants les trous de forage sur les trois lignes d'auscultation. Dans ce tableau, deux résultats sont présentés pour chaque point d'auscultation ce qui représente un essai effectué de chaque côté du forage.

D'après les résultats du tableau 5.2, l'erreur de mesure est substantielle sur les trois points (5, 6, et 20) de la première ligne d'auscultation si on les compare aux épaisseurs réelles présentées dans le tableau 5.1. Il est important de noter que les fréquences dominantes dans le spectre des ondes de compression qui correspondaient aux fréquences de réflexion des ondes étaient difficilement détectables. Les résultats obtenus, sur la deuxième ligne d'auscultation, ne fournissent pas des résultats concluants. La raison principale de ce problème est attribuée à l'épaisseur très mince de la couche de béton au point d'auscultation. Le temps de contact de la sphère sur la paroi de béton est un facteur dominant qui gère la longueur des ondes introduites dans les masses. Dans ce cas-ci, le temps de contact était nettement supérieur à l'épaisseur de la paroi, ce qui empêche de créer un système de résonance répétitive dans la masse de béton.

Les résultats obtenus, sur la troisième ligne d'auscultation, indiquent que l'erreur engendrée est de l'ordre de 25% et plus, ce qui est très élevée. À quelques occasions, il n'a pas été possible de détecter les signaux, notamment aux points 38, 43 et 45. Le tableau 5.2 présente aussi les propriétés dynamiques du béton projeté tel que déterminées à l'aide de la méthode *MSR Impact-Écho*.

Autres problèmes rencontrés lors de ces essais furent la fragilité de la tête des capteurs et la stabilité du système d'acquisition face aux différentes sources de bruit dans un environnement tel qu'une mine. De ce fait, des modifications du système se sont avérées nécessaires.

Tableau 5.2: Résultats de la première séries des essais[†]

Position	Fréquence de l'onde de compression (Hz)	Fréquence de l'onde de cisaillement (Hz)	Épaisseur mesurée (mm)	Épaisseur détectée (mm)	Épaisseur (% erreur)	Module de Young dynamique (GPa)	Rapport de Poisson dynamique ν
5	17285	9741	101	116	15	22	0.27
5	21801	9350	101	92	9	22	0.39
6	12936	8203	140-165	156	11-6	38	0.16
6	13208	8422	140-165	152	9-8	39	0.16
20	19653	11669	107-114	102	4-10	38	0.23
20	20043	11840	107-114	100	6-12	40	0.23
29	20776	12194	25	97	287	2	0.24
29	21423	12194	25	94	276	2	0.26
37	14526	8471	101	138	37	16	0.24
37	14526	7910	101	138	37	14	0.29
38	----	----	101	----		----	----
38	14501	8349	101	139	37	16	0.25
43	----	----	133	----		----	----
43	14526	9008	133	138	4	30	0.19
45	----	----	88-101	----		----	----
45	15136	9179	88-101	133	51-32	18	0.21
46	28588	18237	64	70	10	28	0.16
46	28466	17333	64	71	10	28	0.21

[†] Vitesse d'onde de compression de 4000 m/s, source d'impact à bout sphérique de 1.3 mm de diamètre, 3 essais par résultat, surface non préparée, système de 2e génération.

5.2 Deuxième visite à une mine souterraine

Suite au succès partiel de la dernière investigation, une autre visite à la mine Stobie a été jugée nécessaire suite à des modifications apportées aux instruments du système *MSR Impact-Écho*. L'étude des conditions d'utilisation du système dans un milieu hostile tel que les mines souterraines, a démontré que les capteurs doivent êtres modifiés afin d'empêcher leur endommagement. Afin de réduire considérablement le temps de contact des sources d'impacts pour l'auscultation des parois minces, une autre méthodologie a été employée.

5.2.1 Programme de recherche

Un des buts importants de ce programme de recherche est le développement d'un système robuste pour la détection de l'épaisseur du béton projeté. Afin d'arriver à cette fin, une étude exhaustive a été entreprise pour l'identification d'un capteur robuste qui répond aux besoins de fonctionnement du système *MSR Impact-Écho*. Un critère important du nouveau capteur recherché était la stabilité face aux nombreuses sources de vibrations arbitraires que l'on retrouve dans une mine. Par stabilité on entend un capteur qui ne déclenche pas le système d'acquisition suite à une excitation produite par sa manipulation sur la paroi. Il fallait aussi que le nouveau capteur soit assez petit pour qu'il soit introduit dans un système d'auscultation dans l'avenir.

Afin de s'assurer la répétitivité des résultats, au moins de trois essais furent effectués par point d'auscultation. La figure 5.3 illustre le site d'essais où se sont passés les essais.

5.2.2 Résultats et discussions

L'analyse des résultats *MSR Impact-Écho* est basée sur deux vitesses de propagation d'onde soit celle de 4020 m/s pour le béton projeté avec fibres et 3680 m/s pour le béton projeté sans fibres. Afin d'augmenter la fiabilité du contact capteur/béton projeté, les surfaces d'essais furent légèrement polie à l'aide d'une ponceuse pour béton avant l'application du couplant. La figure 5.4 montre la procédure utilisée pour poncer la surface du point d'essais. Cette procédure ne dure que quelques secondes par position d'essai et elle nécessite une ponceuse équipée d'une pierre pour béton.

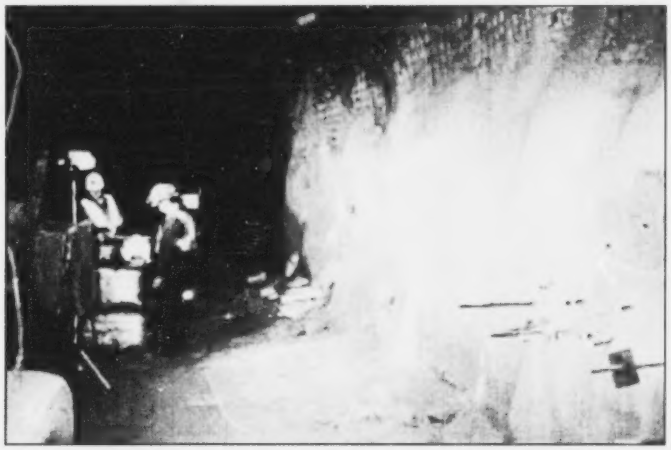


Figure 5.3: Site d'essai dans une mine souterraine.

L'analyse des essais effectués sur la première ligne d'auscultation démontre qu'il est plus facile d'identifier les fréquences de réflexion des ondes de compression qui voyagent entre la surface du béton projeté et l'interface béton projeté/roc. Ici, la préparation des surfaces d'essai a quasiment éliminé le problème de génération des temps de contact courts. L'identification des fréquences de réflexion s'est fait de façon automatique par le logiciel et a produit de bons résultats. Le taux d'échantillonnage a été maintenu à 200 kHz (5 μs) pour la durée des essais ce qui produit une résolution dans le spectre de fréquences de l'ordre de 48.8 Hz. Le tableau 5.3 présente les résultats de la deuxième série d'essais effectués sur les trois lignes d'auscultation. Les épaisseurs réelles ont été mesurées une deuxième fois et comparées aux valeurs présentées dans le tableau 5.1. Les résultats semblent correspondre très bien aux mesures de l'épaisseur de la paroi de béton projeté obtenues à partir des forages. Toutes les erreurs de détection sont plus petites que 8% ce qui est adéquat selon les exigences des professionnels. Au point 6 sur la première ligne d'auscultation, six essais ont eu lieu. L'erreur moyenne de ces six essais était de 2% ce qui équivaut à une erreur d'épaisseur de ± 3 mm. Les essais effectués sur la troisième ligne d'auscultation étaient situés au même endroit que les essais précédents (points 37, 38, 43, 45 et 46).

Figure 5.4: Exemple type du polissage de la surface du béton projeté.

Les propriétés élastiques dynamiques ont été déterminées en utilisant l'épaisseur mesurée du béton projeté et en calculant de nouvelles vitesses d'onde de compression et de cisaillement pour chacune de ces épaisseurs. Les valeurs du module de Young et le rapport de Poisson sont présentées dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3: Résultats de la deuxième série des essais[†]

Position	Fréquence de l'onde de compression (Hz)	Fréquence de l'onde de cisaillement (Hz)	Épaisseur détectée (mm)	Épaisseur mesurée (mm)	Épaisseur (% erreur)	Module de Young dynamique (GPa)	Rapport de Poisson dynamique ν
2	20476	12167	98	91	8	26	0.23
5	20583	12374	98	101	3	33	0.22
6	13505	8195	149	152	2	33	0.21
10	15357	9180	131	123	6	27	0.22
13	24862	14761	81	76	6	27	0.23
17	18225	10959	110	107	3	29	0.22
20	17695	10677	114	110	3	29	0.21
24	19988	11791	101	94	7	27	0.23
29	74783	45139	25	25	2	27	0.21
37	18966	11243	97	101	4	28	0.23
38	19154	11322	96	101	5	28	0.23
43	14943	8819	123	133	7	30	0.23
45	20965	12772	88	94	7	31	0.20
46	29810	18148	62	64	3	29	0.21

[†] Surface préalablement préparée, source d'impact à bout sphérique de 1.3 mm de diamètre, moyenne de 3 essais par résultat, système de 2[e] génération

5.3 Auscultation de cellules d'électrolyse

Cette section décrit l'évaluation de la condition in situ de plusieurs cellules d'électrolyse situées dans différents secteurs d'une affinerie à Montréal. La méthode *MSR Impact-Écho* est particulièrement utile dans ce cas parce qu'elle peut sonder des épaisseurs de moins de 10 cm. L'épaisseur du béton synthétique des bassins de rétention varie entre 7 et 9 cm.

5.3.1 Programme d'investigation

L'acide sulfurique est un électrolyte qui figure dans le processus d'affinage du minerai pour l'extraction du cuivre et d'autres métaux précieux. En plus d'extraire ces autres métaux, des produits secondaires sont éliminés. Le réseau de distribution de l'acide sulfurique comprend des bassins de rétention qui servent à retenir et distribuer l'acide sulfurique dans l'usine. Ces bassins sont en effet des points critiques du réseau de distribution. Ce réseau comprend aussi des cellules d'électrolyse. Ces cellules sont essentielles pour l'extraction du cuivre et des métaux précieux.

La confection de ces cellules consiste à couler un béton synthétique en forme de cuve. Celle-ci est ensuite couverte par une mince couche protectrice en polymère. Au cours de la durée de vie de ces cellules, on note une dégradation de la résine interne du béton. La cause de cette dégradation est difficile à cerner avec exactitude. La source du problème serait liée à: la manipulation des électrodes, les procédures d'entretien, la procédure de fabrication des cellules ou les matériaux utilisés. Les objectifs du projet étaient les suivants:

1. Établir et effectuer une campagne d'acquisition sur des cellules d'électrolyse dans l'usine d'une affinerie de Montréal en respectant les temps limites imposés par le personnel de production.
2. Évaluer, à l'aide d'une technique modifiée et basée sur la méthode *MSR Impact-Écho*, la vitesse de propagation des ondes de contraintes dans les cellules sélectionnées.
3. Effectuer des essais en laboratoire sur des échantillons de cellules en utilisant la même méthodologie que les essais in situ.

L'ensemble des cellules d'électrolyse fait partie intégrante du réseau d'affinage du cuivre dans l'usine. Ce processus utilise un électrolyte à base d'acide sulfurique (concentration de près de 15%). Compte tenu de la nature acide de l'électrolyte, les consignes de sécurité sont d'une grande importance pour tous les employés de l'usine. Celles-ci ont été respectées tout au long de la période d'acquisition des données. Toutes les cellules subissent une procédure de décontamination au préalable de tous travaux dans une cellule.

La cellule de marque CIT possède une forme rectangulaire à ciel ouvert. La figure 5.5 montre une coupe transversale d'un côté du bassin au niveau du drain, tandis que la figure 5.6 montre une coupe au niveau du trop-plein. La désignation NORD, SUD, EST, OUEST identifie les différentes parois de chaque cellule. Dans une section type ayant deux rangées de cellules, une série de 9 cellules possède le drain au niveau du côté SUD. On désigne cette série de cellules comme la « série NORD ». L'autre série de 9 cellules possède le drain au niveau du côté NORD. Cette série de cellules est la « série SUD ». La figure 5.7 montre une vue de dessus de deux séries de cellules qui forment une section, telle que la section 2D (N et S).

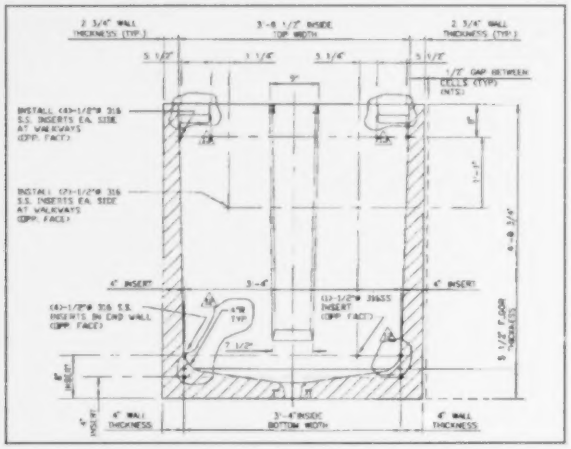


Figure 5.5: Coupe type du côté du drain.

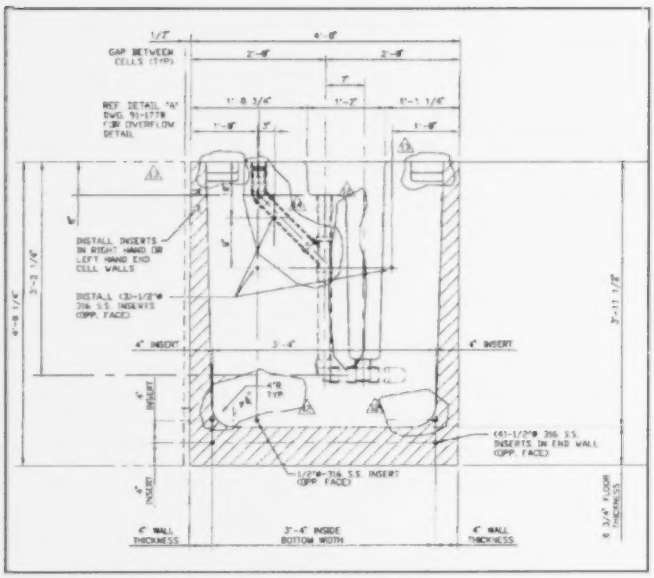


Figure 5.6: Coupe type du côté du trop-plein.

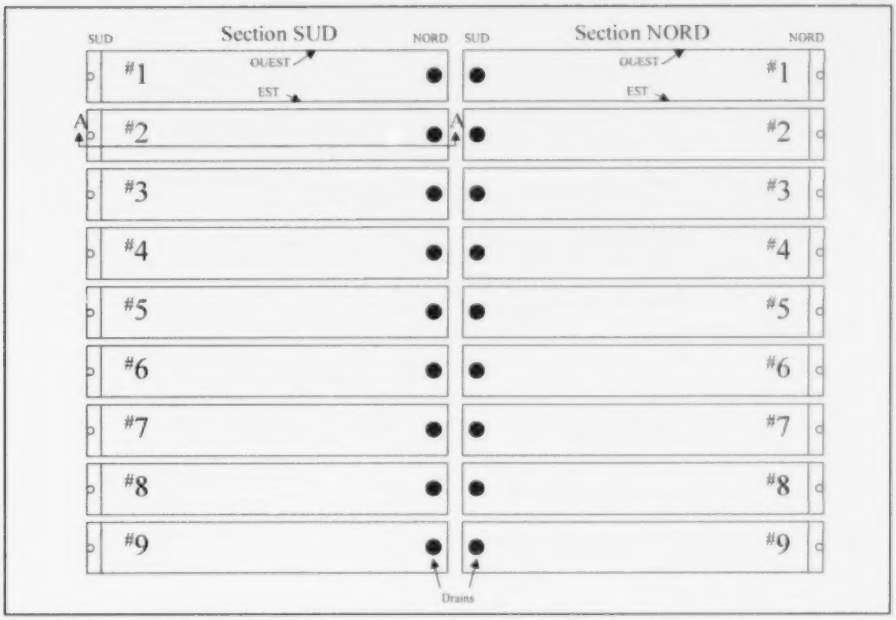


Figure 5.7: Disposition type des cellules d'électrolyse dans les sections SUD et NORD. Notez la numérotation des cellules à partir du côté OUEST.

La campagne d'auscultation sur chaque cellule suit les grilles illustrées dans la figure 5.8 où les points d'essais sont clairement identifiés. Selon la localisation de la cellule soit dans la série Nord ou la série Sud, le drain se trouve près de la façade Nord ou Sud (voir la figure 5.6). Une étude type comme celle-ci, engendre l'évaluation de 109 points d'essais qui se répartissent comme suit:

- 36 points sur chacune des faces Est et Ouest.
- 8 points sur chacune des faces Nord et Sud.
- 21 points au niveau du plancher de la cellule.

5.3.2 Résultats et discussions

Une échelle de vitesses d'ondes de compression (Cp) est établie, à partir des essais effectués au laboratoire sur des échantillons en bon état et dégradés, pour identifier les régions potentiellement problématiques. Ces régions s'identifient par des vitesses inférieures à 3750 m/s. Ici, on considère que ces vitesses faibles sont le résultat d'une infiltration d'acide sulfurique sous la membrane protectrice du béton synthétique. Il est aussi possible que la procédure de mise en place du béton synthétique augmente le niveau de porosité désiré. Les vitesses Cp qui se situent entre 3750 et 4000 m/s représentent des régions affectées plus ou moins par les phénomènes mentionnés ci-dessus. Les vitesses supérieures à 4000 m/s indiquent qu'il n'y a pas de conditions internes dans le béton qui limite la propagation des ondes de compression, cependant la présence

d'armature fibreuse dans la trajectoire de l'onde de compression peut augmenter la vitesse de propagation de celle-ci. En résumé, ces trois limites forment les trois cas suivants:

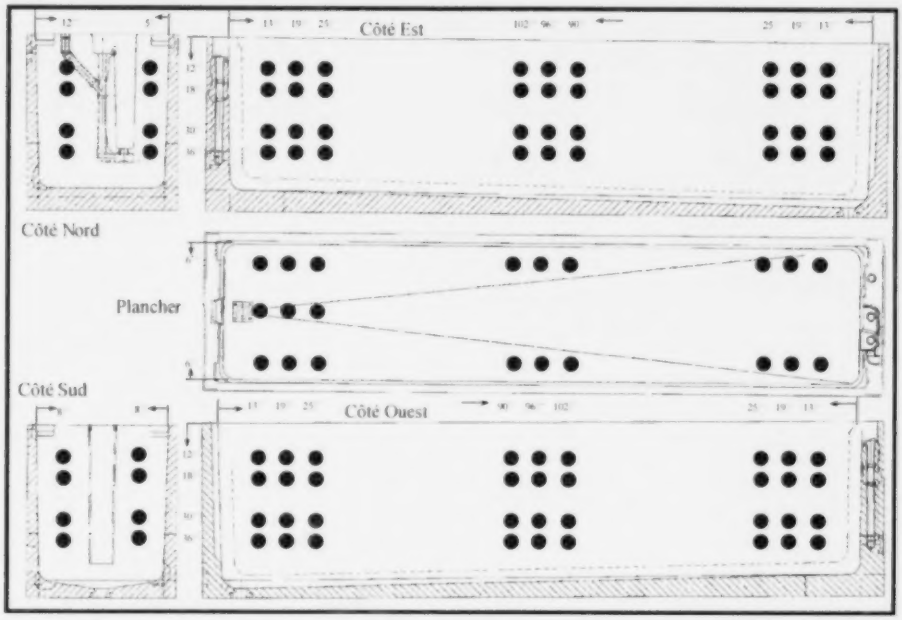


Figure 5.8: Coupes types d'une cellule provenant de la série Nord d'une section de cellules.

1. Cas A : Cp < 3750 m/s
2. Cas B : 3750 m/s < Cp > 4000 m/s
3. Cas C : Cp > 4000 m/s

Ce programme d'essais se divise en trois parties. La première série d'essais est une auscultation complète du côté Ouest, à proximité du côté Sud, et ce à partir de la crête de la cellule jusqu'au plancher. Les colonnes situées à 13", 19" et 25" ont servi de guide pour tracer tous les points. Suivant ces trois colonnes, un point d'essai a été placé sur la paroi à tous intervalles de 3". Ceci dit, chaque colonne compte 15 points d'essais. La seconde série d'essais se situe à 75" de la façade Sud et suit une fissure visible en surface. Elle compte aussi 15 points d'essais. La troisième série se trouve à 108" de la façade Sud. Quinze (15) points figurent aussi dans cette série d'auscultations. Les résultats sont disponibles à la page 74 de ce document. En général, les vitesses Cp sont supérieures à 3750 m/s sauf dans quelques cas isolés, mais concentrés dans les parties supérieures de la cellule. Notons que des vitesses élevées d'ondes de compression dominent la partie inférieure de la cellule.

Une série d'essais en laboratoire a été entamée dans l'espoir d'isoler, si possible, l'origine des vitesses faibles d'onde de compression. Cette section décrit l'ensemble des essais effectués. Une description des échantillons fournis par le client se trouve dans la première sous

section de ce chapitre. Ensuite, une description de la méthodologie des essais paraît dans les paragraphes ci-dessous suivie des résultats ainsi qu'une brève discussion.

Échantillons de cellules

Le client a pu fournir 3 échantillons provenant de ses cellules hors service. Le premier échantillon est en effet un panneau de 4' x 4'extrait d'une cellule fissurée. La coupe du panneau a été centrée sur une fissure importante située sur la crête de la cellule. Les coupes transversales sur le panneau ne dévoilent pas d'infiltration de l'acide sulfurique. Notons toutefois que les coupes se situent à 2 pieds de la fissure. Le deuxième et troisième échantillon est de plus petite taille. Cependant, ils sont saturés d'acide sulfurique.

Panneau de 4' X 4'

Une grille d'auscultation de 14 rangées par 13 colonnes (soit 148 points) a été dessinée sur la paroi intérieure du panneau. Une distance de 3" sépare tous les points d'essais. Le centre de la grille se situe en ligne avec la fissure principale de la cellule. Il est à noter que la fissure a une ouverture d'un peu plus de 1 mm.

L'objectif principal de ces essais est de définir la signature dynamique du panneau à l'aide de la méthode *MSR Impact-Écho*. Suite à ces essais, une étude par voie d'ultrasons est utilisée pour valider les vitesses d'ondes de compression trouvées à l'aide de la méthode mentionnée précédemment. Le système d'ultrasons est de type PUNDIT, soit le modèle standard pour l'inspection d'ouvrages en béton.

Pour assurer la répétitivité des essais, 3 à 5 essais *MSR Impact-Écho* par points sont nécessaires. Lorsque la répétitivité est établie, l'auscultation continue avec un minimum de trois essais par points. Tous les points de la grille d'auscultation font parti de cette analyse.

Dans le cadre des essais par ultrasons, le calibrage standard du système PUNDIT est essentiel pour la validation de tous ces essais. Cette procédure a été effectuée au besoin à des intervalles régulier durant l'auscultation. Deux types d'essais ont été effectués. La première série d'essais implique trois auscultations qui mesurent la vitesse moyenne de l'onde de compression dans le sens horizontal du panneau. La deuxième série inclut l'acquisition de vitesses d'ondes de compression sur toute la colonne 11 du panneau. La méthodologie d'essai et l'instrumentation du système PUNDIT limitent malheureusement la quantité de points pouvant faire l'objet de cette vérification. Il est important de signaler que les valeurs des vitesses, obtenues par la méthode d'ultrasons, sont typiquement de 5 à 10 % supérieurs aux essais *MSR Impact-Écho*.

Pour bien représenter les données *MSR Impact-Écho*, la figure 5.9 présente une distribution des vitesses d'ondes entre tous les points d'auscultation. Notons que cette distribution est en effet une interpolation entre les valeurs de vitesses obtenues. Ce type de graphique permet de mieux voir l'étendue des zones pouvant faire l'objet d'une étude plus poussée dans le futur.

Sur cette figure, on remarque immédiatement que les vitesses sont en général inférieures à 3750 m/s. Ceci dit, les zones plus foncées représentent des vitesses très faibles. Il y a un point toutefois qui montre une vitesse supérieure à 3750 m/s. Ce point se situe à l'intersection (11,12) de la grille d'essais. Présentement, notre client se penche sur ce phénomène en effectuant une étude plus poussée sur la caractérisation chimique et physique du béton synthétique à cet endroit et aussi sur d'autres zones d'intérêt. Les régions de faibles vitesses se trouvent généralement à

proximité et sous la fissure de la colonne 7. De plus, quelques zones d'intérêts se trouvent à la rangée 9, dans la partie supérieure (droite) du panneau.

La vérification de ces vitesses par la voie d'essais par ultrasons fait ressortir des vitesses similaires à celles obtenues avec la méthode *MSR Impact-Écho*. Le tableau 5.4 montre les résultats obtenus pour les trois essais horizontaux. Suite au calibrage du système PUNDIT, le capteur et l'émetteur ont été placés de chaque côté du panneau de façon à assurer la propagation des ondes à travers celui-ci. Les vitesses moyennes varient entre 3416 m/s et 3641 m/s. Les vitesses diminuent vers la base du panneau.

Les essais sur la colonne 11 montrent que les vitesses diminuent aussi vers le bas du panneau (Tableau 5.5). Toutefois, la vitesse trouvée au point (1,11) est nettement supérieure à celle déterminée par la méthode *MSR Impact-Écho* (voir la figure 5.9). Ceci s'explique par les limites techniques du système PUNDIT. Ayant utilisé des capteurs de 54 kHz, le système ne peut fournir avec confiance des valeurs d'épaisseurs de moins de 75 mm. Aux points (13,11), l'épaisseur de la paroi est de 72, 74 et 75 mm respectivement. Donc ces données doivent être interprétées avec précaution. Compte tenu de l'erreur de 5 à 10 % discutés plus haut, les vitesses observées par le système à ultrasons se marient bien avec celles des essais *MSR Impact-Écho*, surtout pour la correction de 10 % (voir le Tableau 5.5).

Tableau 5.4: Vitesses des ultrasons à travers le panneau de 4'x 4'

Rangée	Distance à partir de la crête en pouces	Épaisseur (m)	UPV moy. (m/s)	Correction 10%	Correction 5 %
3	10"	1.201	**3641**	3277	3459
7	21"	1.198	**3550**	3195	3373
12	37"	1.193	**3416**	3074	3245

Tableau 5.5: Vitesses des ultrasons observés sur la colonne 11 du panneau de 4'x 4'.

Rangée	Distance à partir de la crête en pouces	Épaisseur (m)	UPV 1 (m/s)	UPV 2 (m/s)	UPV 3 (m/s)	UPV moy. (m/s)	Correction 10%	Correction 5 %
1	3"	0.072	3986	4054	4031	**4024**	3621	3823
2	6"	0.074	4017	4061	4039	**4039**	3635	3837
3	9"	0.075	4047	4136	4069	**4084**	3675	3879
4	12"	0.077	4054	4075	4119	**4083**	3674	3879
5	15"	0.079	3999	4061	4061	**4040**	3636	3838
6	18"	0.081	3967	4007	3987	**3987**	3588	3788
7	21"	0.082	3995	3995	4054	**4014**	3613	3814
8	24"	0.084	3983	4041	4041	**4022**	3619	3820
9	27"	0.086	3797	3848	3848	**3831**	3448	3639
10	30"	0.088	3824	3857	3840	**3840**	3456	3648
11	33"	0.089	3833	3833	3817	**3828**	3445	3636
12	36"	0.091	3779	3810	3795	**3795**	3415	3605
13	39"	0.093	3758	3758	3758	**3758**	3382	3570
14	42"	0.095	3798	3860	3876	**3845**	3461	33653

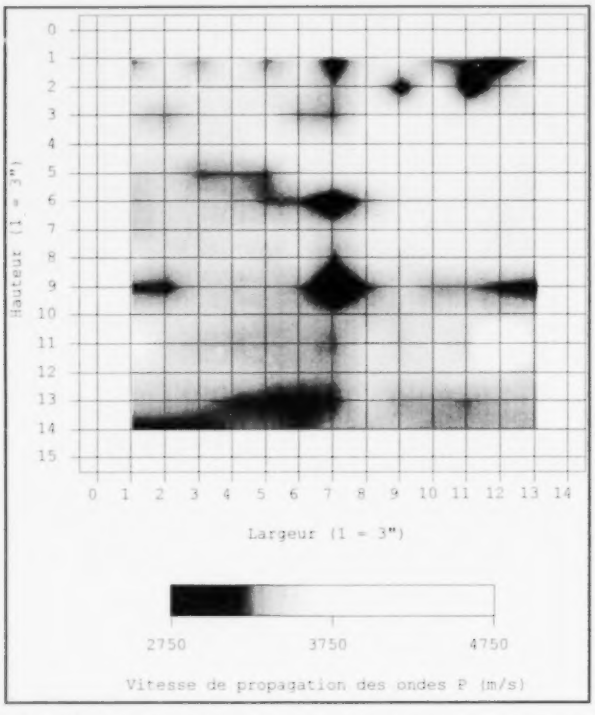


Figure 5.9: Distribution des vitesses d'ondes obtenues sur le panneau 4' x 4'.

Échantillons

L'objectif principal de ces essais est de déterminer la signature dynamique des échantillons en se basant sur la vitesse de propagation des ondes de compression obtenues à l'aide du système *MSR Impact-Écho*. Le plus petit échantillon (échantillon A) mesure environ 18" x 15". L'autre spécimen (échantillon B) mesure environ 16.5" x 21.5". Ces deux échantillons ont été extraits de la partie supérieure (soit la partie la plus mince) d'une cellule. L'auscultation sur les deux échantillons consiste en plusieurs points d'essais, par spécimen, qui se situent dans le centre, mais à 3" d'intervalles. L'échantillon A compte 5 points d'essais, tandis que l'autre compte 6 points. Plusieurs essais (3) ont été effectués à toutes les positions identifiées sur les échantillons.

Le tableau 5.6 présente tous les résultats de l'analyse *MSR Impact-Écho* pour les deux échantillons. Les données suivent l'énumération A1 à A5 et B1 à B6 pour les échantillons A et B de même pour l'échantillon B respectivement. Les valeurs de vitesses Cp se situent toutes sous 3750 m/s. Il est à noter qu'aux points A1 et B6 les vitesses sont inférieures à 3000 m/s. L'échantillon A possède toutefois des vitesses légèrement supérieures à celles de l'échantillon B.

Tableau 5.6: Vitesses C_p obtenus sur les échantillons A et B.

Rangée	Distance à partir de la crête en pouces	Épaisseur (m)	Vitesses C_p (m/s)	Rangée	Distance à partir de la crête en pouces	Épaisseur (m)	Vitesses C_p (m/s)
A1	3"	0.072	**2470**	**B1**	3"	0.072	**3437**
A2	6"	0.074	**3516**	**B2**	6"	0.074	**3116**
A3	9"	0.075	**3543**	**B3**	9"	0.075	**3296**
A4	12"	0.077	**3572**	**B4**	12"	0.077	**3064**
A5	15"	0.079	**3243**	**B5**	15"	0.079	**3481**
				B6	18"	0.081	**2883**

5.4 Localisation des conduits électriques dans le métro de Montréal

Cette section décrit l'application de la technologie *MSR Impact-Écho* pour localiser les conduits du courant électrique dans le métro de Montréal. Les travaux d'investigation ont été effectués à la demande du syndicat des travailleurs.

5.4.1 Programme d'investigation

Le syndicat des travailleurs du métro avait demandé à la Société du Transport de la Communauté Urbaine de Montréal (STCUM) d'élargir la plate-forme d'accès dans les tunnels du métro de Montréal pour des raisons de sécurité des ouvriers. Un accident était survenu lors duquel un ouvrier qui travaillait sur la plate-forme avait perdu sa vie quand un train de métro l'a heurté dans le tunnel. Le projet d'élargissement consistait à ajouter une section de 1 pied de largeur à la plate-forme des deux cotés du tunnel. Or, pour arriver à construire cette extension, il faut d'abord forer le béton pour installer les ancres de soutien. D'après les plans du métro, la plate-forme abrite plusieurs conduits de courant électrique à très haut voltage. Les conduits ont été placés à quelques centimètres de la face verticale (voir figure 5.10). Pour éviter des incidents fâcheux lors de la campagne de forage, par exemple électrocuter l'ouvrier qui opère la foreuse, il était essentiel de connaître avec précision la distance entre la surface verticale et le(s) conduit(s). L'emplacement des tuyaux dans le béton varie de plusieurs centimètres sur une distance de quelques dizaines de mètre, ce qui élimine l'option de faire des trous « à l'aveuglette ».

La technique *MSR Impact-Écho* est une méthode non destructive capable d'offrir cette information avec une précision de quelques millimètres. L'équipe du laboratoire d'auscultation de l'Université McGill a passé une semaine à faire la démonstration du potentiel de cette technologie et mesurer l'épaisseur du béton entre la face verticale de la plate-forme et les conduits. Les travaux d'investigation furent effectués entre 01:45 et 03:45 du matin quand le métro était fermé. Des données ont été prélevées sur une section de 500 mètres afin de fournir une bonne idée de l'épaisseur moyenne du béton.

Après avoir passé la première nuit à calibrer le système de façon exhaustive pour obtenir une valeur de vitesse d'onde de compression la plus précise, nous avons procédé à l'acquisition des données sur la section sélectionnée. Deux profils, soient à 1 et 2 pieds de hauteur respectivement, ont été tracés et des lectures ont été collectées sur un intervalle de 2 pieds. La figure 5.11 présente les travaux en cours dans la station de Snowdon.

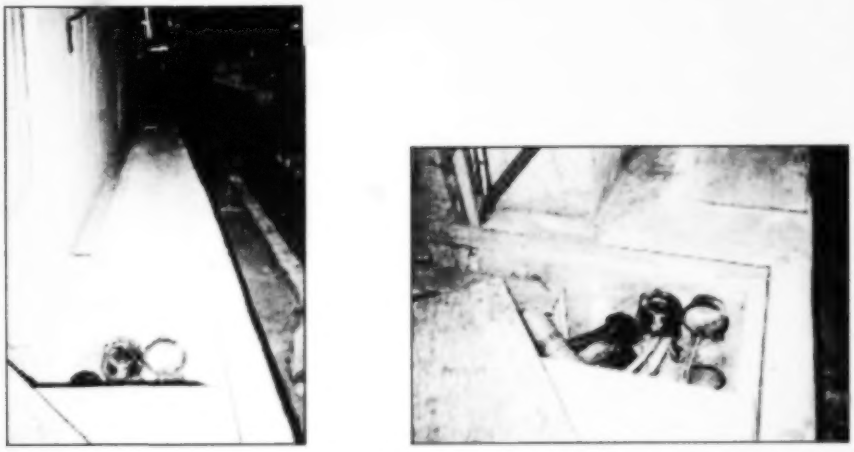


Figure 5.10: L'emplacement des conduits électriques dans la plate-forme du métro.

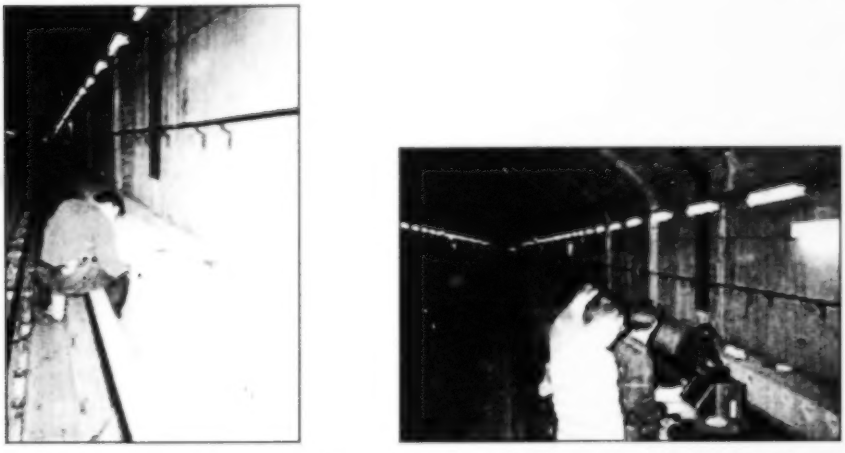


Figure 5.11: Travaux de préparation de la surface du béton et acquisition de données.

5.4.2 Résultats et discussion

Nous présentons dans cette section le résultat de quelques points sur le tronçon investigué. Il s'agit des points du profil du haut. Pour vérifier l'exactitude de nos estimations, les ingénieurs de la STCUM ont foré tous les points où des données *MSR Impact-Écho* ont été collectées. Le tableau 5.7 présente le résultat des essais sur une distance de 20 pieds. On peut y voir la variation de l'épaisseur du béton entre la face verticale et les conduits.

A plusieurs endroits, par exemple au point numéro 7 – colonne 4, la perceuse a traversé plus de 25 cm de béton (perpendiculaire à la surface verticale) sans atteindre le conduit. Dans ces cas-ci, la géométrie et l'emplacement des tuyaux n'ont pas permis aux ingénieurs d'atteindre

la cible. Mais la méthode *MSR Impact-Écho* a pu « repérer » le conduit à cause de la façon dont les ondes se propagent. Les figures 5.12, 5.13 et 5.14 illustrent la situation où l'examen direct par un trou de forage manque sa cible mais que la sonde arrive à déterminer l'emplacement du conduit. Il important de noter que le point crucial pour le syndicat des travailleurs était de connaître la distance minimale exacte qu'il pouvait percer dans le béton sans se soucier à traverser les câbles à haute tension. D'autres techniques comme le géoradar avaient été essayées sans donner des résultats aussi précis que la technique *MSR Impact-Écho*.

Tableau 5.7: Distance entre la face verticale de la plate-forme et les conduits électriques.

Position des points d'essais	Profondeur de l'anomalie " - (m)
1 : Point de calibrage	6" (0,150 m) – Épaisseur du mur
2 : Point de calibrage	Idem
3 : Point de calibrage	Idem
4 : Colonne 1, pt. #1	6.7" (0,170 m)
5 : Colonne 1, pt. #2	6.7" (0,170 m)
6 : Colonne 2, pt. #3	6.0" (0,150 m)
7 : Colonne 2, pt. #4	6.3" (0,160 m)
8 : Colonne 3, pt. #5	5.1" (0,130 m)
9 : Colonne 3, pt. #6	5.1" (0,130 m)
10 : Colonne 4, pt. #7	8.7" (0,220 m)
11 : Colonne 4, pt. #8	5.1" (0,130 m)

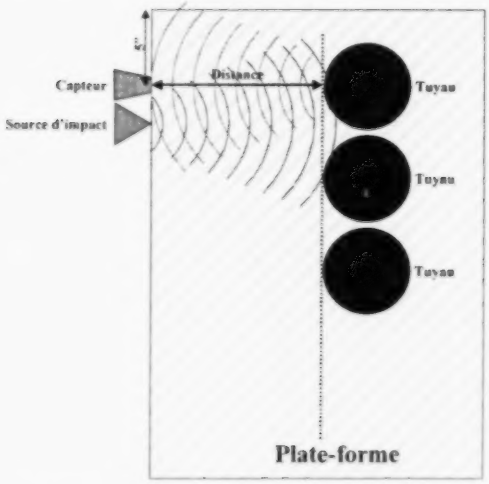


Figure 5.12: Les ondes traversent le béton perpendiculairement à la surface et atteignent leur cible.

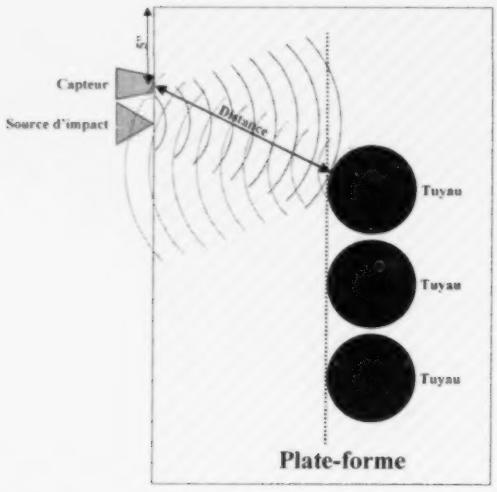


Figure 5.13: Les ondes traversent le béton en diagonale et atteignent leur cible.

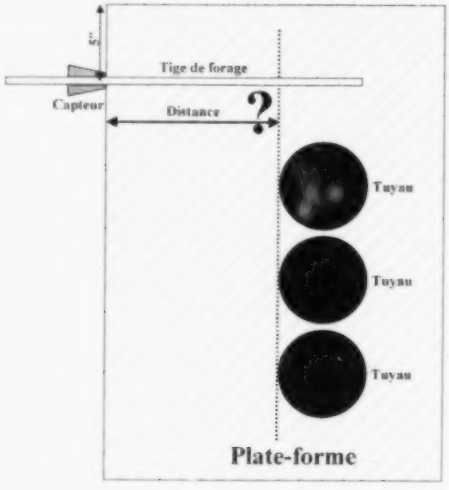


Figure 5.14: La tige de forage manque sa cible.

6.0 CONCLUSIONS

Ce rapport traite du développement d'un système d'auscultation axé sur l'évaluation de l'épaisseur du béton projeté et de ses caractéristiques élastiques dynamiques. Le béton projeté est couramment utilisé dans les mines souterraines comme moyen de support de terrain qui garantie jusqu'à un certain point la sécurité des ouvriers dans ce secteur d'activité. Malgré certains avantages importants de ce type de système de support de terrain, plusieurs problèmes ont été identifiés tels que le manque d'un système de contrôle de la qualité en ce qui concerne l'application du béton projeté et l'état réel de la couche de béton projeté.

Les résultats tirés des essais en laboratoire sur des échantillons de béton projeté ayant différentes épaisseurs (5, 10, 15 et 20 cm) montrent qu'il faut s'attendre à une vitesse d'onde de compression et de cisaillement, supérieure dans le béton projeté ayant des fibres métalliques. Dans le cas du béton projeté sans fibres, la vitesse moyenne de l'onde de compression est de 3680 m/s et celle de l'onde de cisaillement est égale à 2224 m/s. En ce qui concerne le béton projeté avec fibres métalliques, la vitesse de l'onde de compression et de cisaillement est de 4020 m/s et 2415 m/s respectivement. Les vitesses d'ondes de compression et de cisaillement, déterminées par la voie de ces essais ont été utilisées avec succès dans une auscultation en chantier. Dans la mesure du possible, il est préférable de procéder à une calibration avant de commencer une série d'acquisition afin d'avoir des valeurs de vitesse les plus précise pour chaque site.

Les propriétés mécaniques du béton projeté déterminées avec la méthode MSR Impact-Écho sont en moyenne entre 12% et 25% inférieures aux valeurs statiques en ce qui concerne le module d'élasticité et entre 0% et 12% pour le coefficient de Poisson.

Cette méthode a été également utilisée pour évaluer l'épaisseur de parois de béton projeté dans les mines souterraines. Une première auscultation a été menée avec la deuxième génération du système *MSR Impact-Écho* afin d'évaluer ses capacités et limites dans un environnement hostile tel que les mines souterraines. Ces essais ont confirmé qu'il est possible de déterminer l'épaisseur du béton projeté avec une précision de quelques millimètres et d'en faire l'évaluation des propriétés élastiques dynamiques. La nouvelle procédure de préparation de surface du béton, c'est-à-dire polissage de la surface à l'aide d'une ponceuse pour béton, nous a permis de pouvoir ausculter des épaisseurs de plus en plus minces. La limite établie à date pour le béton projeté se situe aux alentours de 5 cm. De plus, les nouveaux capteurs miniaturisés et le boîtier conçu pour chaque capteur ont permis d'avoir sous la main un prototype beaucoup plus robuste et à l'abri des endommagements qu'il peut subir dans un environnement hostile.

Les auteurs de ce rapport ont trouvé également de nouveaux domaines d'application à l'instrument pour déterminer l'épaisseur et la qualité de différentes variétés de béton mince. La localisation des conduits électriques enfouie la plate-forme de béton du tunnel du métro de Montréal en est un exemple. Le projet nous a été transmis pour des raisons de sécurité des ouvriers. La technologie *MSR Impact-Écho* a su répondre aux attentes du syndicat des travailleurs de la STM et a fourni la réponse recherchée.

Les travaux d'investigation sur les bassins de rétention dans les affineries ont permis d'évaluer l'intégrité des cellules aux endroits où l'acide sulfurique avait attaqué la mince couche de béton synthétique. Chacun de ces bassins coûte de $100,000 à $200,000. Il est donc essentiel de prolonger au maximum la durée de vie de ces cellules. Notre intervention a démontré le potentiel de la technologie *MSR Impact-Écho*. Nous avons reçu une offre de la part de l'affinerie

concernant le développement d'une méthodologie pour la surveillance régulière des cellules d'électrolyte.

Bien que tous les essais effectués dans le cadre de ce projet de recherche concernent le béton projeté contenant des fibres métalliques du type NOVOCON, nous sommes d'avis qu'il serait possible d'obtenir des résultats semblables avec d'autres types de fibres métalliques dans le béton projeté. Toutefois, la densité de fibres métalliques utilisée influence la vitesse de propagation des ondes de compressions et de cisaillement dans le béton projeté. Il serait donc utile de faire des essais supplémentaires sur du béton projeté ayant une densité de fibres différentes afin de mieux connaître les propriétés physiques de ce matériau.

Au terme de ce projet, il est clair que la méthode *MSR Impact-Écho* est une méthode non destructive capable de mesurer avec une grande précision l'épaisseur et la qualité du béton projeté. Nous avons obtenu une erreur moyenne inférieure à 8% (sur 3 essais) pour des épaisseurs de béton projeté de 50 à 150 mm. La nouvelle version du prototype est beaucoup plus robuste et se trouve à quelques pas du stage de commercialisation. Toutefois, il reste à améliorer certains points tels que la possibilité de mesurer des épaisseurs de moins de 50 mm et la miniaturisation du système d'acquisition et de traitement afin de permettre à l'usager de porter l'instrument en tout temps sur lui, soit dans sa main, sur son épaule ou autour de sa taille.

7.0 BIBLIOGRAPHIE

ASTM E610-82, (1991). Standard Definitions Relating to Acoustic Emission. Annual book of ASTM Standards, Philadelphia, Vol. 2.03, p. 373.

Bell, J.R., Leonards, G.A., Dolch, W.L., (1963). Determination of Moisture Content of Hardened Concrete and its Dielectric Properties. Compte rendu, ASTM, V. 63, pp. 996-1007.

Boot, A.R., Watson, A., (1965). Applications of Centimetric Radio Waves in Nodestructive Testing. Dans *Application of Advanced and Nuclear Physics to Testing Materials*, STP-373, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, pp. 3-24.

Bracs, G., Balint, E., Orchard, D.F., (1970). Use of Electrical Resistance Probes in Tracing Moisture Permeation Through Concrete. ACI Journal, Proceedings, V. 67, No. 8, Aug. 1970, pp. 642-646.

Bray, D.E., Stanley, R.K., (1997). Nondestructive evaluation - Revised edition. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, États-Unis, 586 p.

Brown, B.R., Kelly, R.T., (1969). Practical Applications of Nondestructive Testing Techniques For Concrete. Proceedings, Symposium on Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, Londres, Juin 1969, pp. 43-45.

Browne, L.J.I., (1968). Nondestructive Testing of Concrete: A Survey. Nondestructive Testing, Fevrier 1968, pp. 159-164.

Cantor, T., Kneeter, C., (1982). Radar as Applied to Bridge Decks. Transportation Research Record, 852, 37.

Cartz, L., (1995). Nondestructive testing. ASM International, États-Unis, 229 p.

Clemeña, G.G. (1991). Chapter 11:Short Pulse Radar Methods. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, V.M. Malhotra and N.J. Carino éditeurs, CRC Press Inc., Boca Raton, Floride, États-Unis, pp. 253-274.

CNS Farnell, (1994). Manuel d'utilisation du système PUNDIT. Rédigé par la compagnie CNS Farnell pour le système PUNDIT modèle MARK V, 76 p.

Elvery, R.H., Din, N.M, (1969). Ultrasonic Inspection of Reinforced Concrete Flexural Members. Proc. Symp. on Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, Londres, Juin, p.23

Evans, R.H., Robinson, G.W., (1955). Stress in Prestressed Concrete from X-ray Photographs. Proc. Insttitution of Civil Engineers, Londre, Mars, V. 4, No. 2, Part I, pp. 212-235.

Facaoaru, I., (1969). Non-Destructive Testing of Concrete in Romania. Proceedings, Symposium on Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, Londres, Juin 1969, pp. 23-33.

Foster, B., (1968). Attenuation of X-rays and Gamma Rays in Concrete. Materials Reserach and Standards, V. 8, No. 3, Mars 1968, pp. 19-24.

Green, A.T., (1970). Stress Wave Emission and Fracture of Concrete Reactor Vessel Materials. Proc. Interamerican Conf. on Materials Technology. American Society of Mechanical Engineers, Vol. I, p. 635.

Hammond, E., Robson, T.D., (1955). Comparison of Electrical Properties of Various Cements and Concretes. The Engineer, Londres, V. 155, Jan. 1955, pp. 78-80, 114-115.

Hassani, F.P., Momayez, M., Wang, E., (1989). Concrete Shaft Lining: Thickness Measurement and Quality Control. Departement de Génie Minier et Métallurgique, Université McGill, Montréal, Canada. pp. 263-308.

Hassani, F.P., Sadri, A., Momayez, A. (1997b). A miniature seismic reflection system for evaluation of concrete linings. Pure and Applied Geophysics, vol. 150, 1997, pp. 677-691.

Kaiser, J. (1950). Untersuchungen uber das autfreten Geraushen beim Zugversuch. Ph.D., Technische Hochschule, Munich.

Knab, R., Mathey, R.G., Jenkins, D., (1981). Laboratory evaluation of nondestructive methods to measure moisture in built-up roofing systems. National Bureau of Standards Building Science Series, No. 1311.

Lauer, K.R. (1991). Chapter 9: Magnetic and Electrical Methods. *CRC Handbook on Non-destructive Testing of Concrete*, CRC Press, éditeurs, V.M. Malhotra, N.J. Carino, pp. 203-225.

Li, Z., Li, F., Zdunek, A., Landis, E., Shah, S.P. (1998). Application of acoustic emission technique to detection of reinforcing steel corrosion in concrete. ACI Materials Journal, v. 95, no. 1, Jan.-Fév. 1998, pp. 68-76.

Li, S., Ramakrishan, V., Russel, J.E., (1972). Advances in Nondestructive Testing of Concrete. Highway Research Record No. 378, Nondestructive Testing of Concrete.

Lim, M.K., Koo, T.K., (1989). Acoustic Emission from Reinforced Concrete Beams. Magazine of concrete Research, Vol. 41, No. 149, Décembre, pp.229-234.

Lin, J.-M., Sansalone, M., (1997). A procedure for determining P-wave speed in concrete for use in Impact-Echo Testing using a Rayleigh wave speed measurement technique. American Concrete Institute, ACI SP-168, pp. 137-165.

Lozev, M.G., Lane, D.S.; Clemena, G.G.; Nakleh, N.J.,(1996). Nondestructive Evaluation of Concrete Consolidation Using a Pulsed Ultrasonic Interferometer. Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, pp. 39-54.

Malhotra, V.M. and Sivasundaram, V., (2004). Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. 2nd Edition. CRC Press, editors, V.M. Malhotra, N.J. Carino, pp. 7-11.

McHenry, D., Oleson, C.C., (1967). Pulse Velocity Measurement on Concrete Dams. Trans. 9th Int. Congr. on Large Dams. Istanbul, Q34, R5, V. 3, 73.

Mindess, S., (1982). Acoustic Emission and Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete. Int. Journal Cement Composites in Lightweight Concretes, 4, p. 173.

Mindess, S., (1991). Chapitre 14: Acoustic Emission Methods. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, V.M. Malhotra and N.J. Carino éditeurs, CRC Press Inc., Boca Raton, Floride, États-Unis, pp. 317-333.

Mitchell, T.M., (1991). Chapter 10: Radioactive/Nuclear Methods. CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, editors, V.M. Malhotra, N.J. Carino, pp. 227-252.

Mix, P.E., (1987). Introduction to Nondestructive Testing - A Training Guide. Wiley & Sons Inc.

Momayez, M., Hassani, F.P., (1992). Application of the Kaiser Effect to measure in-situ stresses in underground mines. Rock Mechanics, Tillerson et Wawersik (éditeurs), 1992, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, pp. 979-988.

Monfore, G.E. (1968). The electrical resistivity of concrete. J. PCA Res. Dev. Lab., 10(2).

Moore, R.W., (1968). Earth-Resistivity Tests Applied as a Rapid, Nondestructive Procedure for Determining Thickness of Concrete Pavements. Highway Research record, No. 218, pp. 49-55.

Mullins, L., Pearson, H.M., (1949). The X-Ray Examination of Concrete. Civil Engineering and Public Works Review, London, England, V.44, No. 515, Mai 1949, pp. 256-258.

Naik, T.R., Malhotra, V.M., (1991). Chapter 7: The Ultrasonic Pulse Velocity Method. CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, éditeur, V.M. Malhotra, N.J. Carino, pp. 169-188.

Nikkanen, P. (1962). On the electrical properties of concrete and their applications. Sarja III, Rakennus 60, version française.

Oleesky, S.S., Mohr, J.G., (1964). Handbook of Reinforced Plastics. Reihold Publishing Corp., New York, pp. 568-574.

Robertshaw, J., Brown, P.D., (1955). Geophysical Methods of Exploration and their Application to Civil Engineering Problems. Proceedings, The institution of Civil Engineers (Londres), V. 4, No. 5, Part. 1, Sept. 1955, pp.645-690.

Robinson, G.S., (1968). Methods of Detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete. Proc. Int. Symp. on the Structure of Concrete, Brooks, A.E., et Newman, K., éditeurs, Londres, Cement and Concrete Association, p. 161.

Rüsch, H., (1959). Physical Problems in Testing of Concrete. *Zement-Kalk-Gips*, 12,1.

Saleh, K., Hassani, F.P., Guevremont, P., Sadri, A., Lapointe, R., Ballivy, G., Rhazi, J., Kharrat, Y. (1997). Three seismic nondestructive methods used to monitor concrete slab injection tests. Pure and Applied Geophysics, vol. 150, no. 3, pp. 605-625.

Selleck, S.F., Landis, E.N., Peterson, M.L., Shah, S.P., Achenback, J.D. (1998). Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage. ACI Materials Journal, vol. 95, no. 1, Jan-Fév. 1998, pp.27-36.

Skazlic, M., Stipanovic, I. and Krolo, J. (2003). Evaluation of Shotcrete Quality Using Different Methods. Proceedings of the Non-Destructive Testing in Civil Engineering Symposium, September 2003, Berlin, Germany.

Slate, F.O., Olsefski, S., (1963). X-rays for Study of Internal Structure and Microcracking of Concrete. ACI Journal, Proceedings, V. 60, No. 5,Mai 1963, pp. 575-588.

Smith, R., (1984). The use of surface scanning waves to detect surface opening cracks in concrete. Presentation at Int. Conf. on In-Situ Nondestructive Testing of Concrete, Ottawa, pp.557.

Tanigawa, Y., Kobayashi, H., (1979). A Study on Acoustic Emission of Concrete. Rev. 33rd General Meeting, Cement Association of Japan, Tokyo, p.159.

Weil, G.J., (1991). Chapter 13: Infrared Thermographic Techniques. CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, editors, V.M. Malhotra, N.J. Carino, pp. 305-316.

Wells, D., (1970). An Acoustic Apparatus to Record Emissions from Concrete Under Strain. Nuclear Engineering and Design, 12, 80.

ANNEXE A

(Revue de la littérature des méthodes non destructives)

A.0 REVUE DE LA LITTÉRATURE

A.1 Les méthodes nucléaires

L'utilisation des techniques à rayons X et à rayons GAMMA pour l'inspection non destructive du béton est relativement récente. Ces méthodes se basent sur le principe d'absorption des rayons X ou rayons GAMMA dans le béton de façon que les régions d'un matériau ayant une densité plus importante absorbent une plus grande partie de la radiation. Les techniques employées dans l'industrie du béton sont principalement la radiographie et la radiométrie.

A.1.1 La radiographie

La technique par radiographie cherche à optimiser la netteté et la qualité des images d'échantillons ainsi que limiter le temps d'exposition aux rayons. La qualité d'une radiographie se lie aux caractéristiques de pénétration des rayons X ou des rayons GAMMA. La figure 4 illustre un montage type d'un appareil à rayons X pour l'analyse d'un échantillon.

Principes de base

Une perte de définition d'une image captée par radiographie est en fonction de la taille de la source, la distance entre la source et l'échantillon ainsi que la distance qui sépare le spécimen du film. Il est important de garder le film dans une position parfaitement horizontale, de façon à limiter la distorsion de l'image du spécimen sur le film.

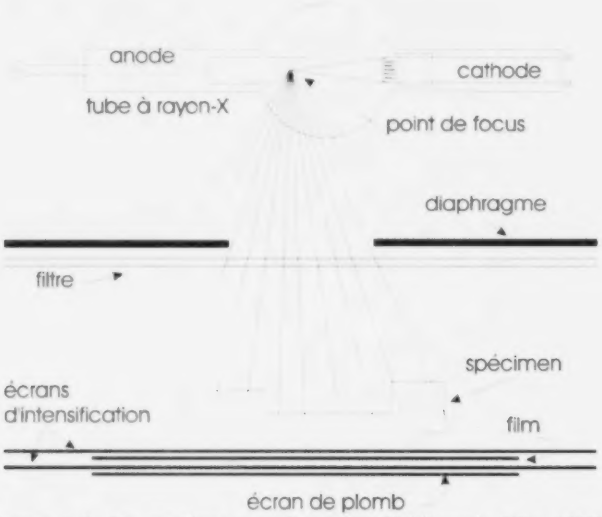


Figure A.1: Un système type à rayons X [d'après Mix, 1987].

Il existe des conditions idéales qui aident à accroître la qualité de la projection de l'image [Mix, 1987]:

1) Le foyer doit être minimisé en utilisant une source de rayons en forme de pointe;
2) La source émettrice de rayons X et l'échantillon doivent être séparés d'une distance maximale sans pour autant perdre le niveau nécessaire de pénétration des rayons X;
3) La séparation entre le film et le spécimen doit être minimisée;
4) La direction des rayons X doit être perpendiculaire à la surface du film, ce qui n'est souvent pas le cas;
5) Le plan du spécimen doit être parallèle au plan du film.

Il y a toujours une certaine quantité de distorsion de l'image causée par une différence d'élévation à certains endroits sur la surface d'un échantillon. De plus, il est souvent impossible de garder toutes les surfaces de l'échantillon parallèles à la surface du film. Il est cependant possible de réussir une radiographie complète et adéquate en changeant l'angle de la source émettrice de façon à garder la source perpendiculaire aux surfaces de l'échantillon. L'évaluation de la grandeur, de la forme et de la position des défauts devient ainsi plus précise [Mix, 1987].

Dans le cas du béton, les sources de rayons X, utilisées pour la radiographie, possèdent des énergies maximales qui varient de 30 à 125 keV. L'atténuation dans cette gamme d'énergie n'est pas uniquement dépendante de la quantité d'énergie des rayons X, mais du numéro atomique des matériaux absorbants tels que l'armature et le béton [Foster, 1968]. Les sources de rayons GAMMA pour le béton fonctionnent à des niveaux d'énergies maximales qui varient entre 0.3 et 1.33 meV. Le mécanisme dominant de l'atténuation est, pour cette gamme d'énergie, relativement indépendant du numéro atomique. Dans le cas des rayons GAMMA d'un isotope donné, l'atténuation par unité d'épaisseur est proportionnelle à la densité du matériau absorbant.

A.1.1.1 Applications de la radiographie à rayons X

C'est en 1949 que Mullins et Pearson font les premiers essais sur le béton en utilisant la technique de la radiographie à rayons X. Les essais avaient pour objectifs de déterminer la variation de la densité dans une dalle de béton et de localiser l'armature. En 1955, Evans et Robinson entament des recherches en utilisant la même technique, mais dans le cadre de l'évaluation des contraintes d'adhérence de l'armature à l'intérieur de poutres en béton précontraintes. Depuis, les études de recherche d'envergure sur ce sujet sont très limitées. Brown et Kelly (1969) attribuent cette réalité au coût d'instrumentation très élevé, ainsi qu'à la difficulté de transport et d'utilisation de l'équipement en chantier.

Les applications de cette technologie en laboratoire ont été nombreuses dans les années 1960. La majorité des expériences durant cette période avaient comme objectif principal, l'étude de la structure interne du béton. En 1963 par exemple, Slate et Olsefski ont concentré leur recherche sur l'observation directe de l'agencement des granulats. Ils ont spécifiquement considéré l'espace séparant les granulats et l'épaisseur de la pâte de ciment. Cette investigation portait également sur d'autres phénomènes tels que l'observation en trois dimensions des vides d'air entraînés, l'effet de la ségrégation des granulats et la présence de fissures.

Certains chercheurs ont d'ailleurs estimé que la méthode par radiographie à rayons X est supérieure à l'observation microscopique. La radiographie permet donc une visualisation interne du spécimen et une amélioration de la détection de fissures d'adhérence. Slate et Olsefski cautionnent toutefois, que l'interprétation des données doit être entreprise de façon judicieuse.

A.1.1.2 Applications de la radiographie gamma

Les radiographies GAMMA sont produites par l'interaction entre la radiation qui émerge d'un échantillon et un film photographique spécialement choisi pour ce type d'essai. Plus l'intensité de rayons GAMMA est importante, plus grande est l'interaction avec le film photographique. Les avantages de cette technique résident dans sa capacité de déterminer la position et la condition de l'armature, la quantité de vides dans le béton et la position des vides dans les coulis d'injections de poutres ou de dalles post-contraintes. La méthode d'auscultation par radiographie GAMMA est plus populaire au Royaume-Uni et en Europe. L'équipement est portatif, les coûts d'opérations sont négligeables et il est possible d'examiner le béton jusqu'à une profondeur de 450 mm. Il faut noter la possibilité d'utiliser, à grande échelle, la technique par radiographie GAMMA dans les usines de béton préfabriqué.

A.1.2 La radiométrie

La technique par radiométrie utilise des rayons GAMMA et fut utilisée pour la première fois par Smith et Whiffin en 1952. Les rayons GAMMA sont générés par un radio-isotope spécialement conçu pour pénétrer le béton. L'intensité de la radiation qui émerge du spécimen, est décelée par des détecteurs de radiation tels que les compteurs de scintillements ou Geiger. Lorsque le rayon GAMMA qui se propage sous forme de radiation à haute énergie pénètre dans le béton, une première partie du rayon est absorbée, une deuxième partie émerge et une troisième partie est dispersée dans le béton. La partie qui émerge du béton est employée pour ces études. La dispersion des rayons GAMMA est le résultat d'une ou de plusieurs collisions entre les électrons et un matériau absorbant. Contrairement à la méthode par radiographie, la radiométrie n'utilise pas de pellicule photographique. Cette technique est connue sous deux noms: a) "backscatter" et b) à transmission directe (voir figure A.2). Essentiellement, la méthode "backscatter" est utilisée lorsqu'on a accès à seulement une surface du spécimen. Comme le nom l'indique, la méthode par transmission directe est employée lorsqu'on a accès à deux surfaces parallèles.

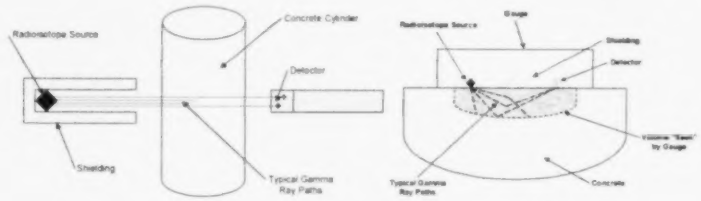


Figure A.2: La technique par radiométrie:
A) transmission directe et B) "backscatter" [Mitchell, 1991].

La radiométrie GAMMA est utilisée pour déterminer la densité in situ de membres structuraux, l'épaisseur de dalles de béton ainsi que la variation de la densité de carottes de béton. En 1969, Facaoaru écrit sur l'utilisation de la radiométrie GAMMA en Roumanie pour déterminer le niveau de consolidation à l'intérieur de certaines colonnes en béton de dimensions allant jusqu'à 410 x 610 mm. Par ailleurs, la technique à transmission directe possède certaines limitations (accès à deux surfaces), mais procure aux utilisateurs la possibilité de déterminer l'épaisseur et la densité du béton ainsi que la position de l'armature. Cette méthode est très précise, applicable au béton frais et insensible à la composition chimique du béton. La méthode

"backscatter" permet de déterminer la densité du béton frais ou durci. Cette technique est sensible à la composition chimique du béton et les variations de surfaces. De plus, la profondeur de pénétration dans le béton est limitée. Un avantage important de cette méthode est la capacité d'ausculter continuellement de grands volumes de béton [Mitchell, 1991].

A.2 Les méthodes électriques

Les méthodes électriques ont été employées pour mesurer l'épaisseur du béton en utilisant la permittivité relative. Cette méthode a également été utilisée pour localiser la position d'armatures dans les chaussées et les dalles de béton. Les problèmes qui peuvent survenir sont principalement dus à la variation de température et la teneur en eau à l'intérieur du béton.

A.2.1 Nature électrique du béton

La teneur en eau évaporable dans le béton varie en fonction du rapport eau/ciment, du niveau d'hydratation ainsi que du niveau de saturation. L'eau évaporable contient en général les ions Na^+, K^+, Ca^{2+}, SO^{2-} et OH^- et les concentrations de ces ions varient avec le temps [Lauer, 1991]. Nikkanin (1962) suggère que la conduction de l'électricité dans un béton humide est essentiellement électrolytique. Un électrolyte est essentiellement une matière (ou solution) qui peut être soumise à l'électrolyse, c'est-à-dire à la conductivité électrique. La résistance d'un électrolyte ou de n'importe quel autre matériau, est directement proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnel à la superficie d'une coupe de la section [Monfore, 1968]:

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{A.1}$$

où R = Résistance (Ω)
ρ = Résistivité (Ωcm)
L = longueur (cm)
A = Surface de la section (cm^2)

La résistivité (ρ) est essentiellement constante pour un matériau soumis à des conditions environnementales constantes. Cette valeur est représentative de la résistance d'un spécimen cubique de 1 cm^3. La loi d'Ohm dicte que le courant continu traversant un conducteur métallique est directement proportionnel au potentiel appliqué et inversement proportionnel à la résistance du conducteur telle que montrée dans l'équation 2.2:

$$I = \frac{E}{R} \tag{A.2}$$

où I = Courant (ampère)
E = Potentiel (volt)

Si le conducteur est un électrolyte, le passage du courant directe (le mouvement des ions) cause la polarisation et l'établissement d'un potentiel aux électrodes qui opposent le potentiel appliqué. Dans ce cas, le courant est calculé en utilisant l'équation 2.3:

$$I = \frac{E_a - E_p}{R} \tag{A.3}$$

où E_a = Potentiel appliqué (volt)
E_p = Potentiel polarisé (volt)

Le potentiel polarisé est le résultat de réactions qui prennent place aux électrodes. Les réactions dépendent des ions présents ainsi que des matériaux constituants les électrodes. Il est toutefois possible que de minces couches d'oxygène, d'hydrogène ou autres gazes se forment sur les électrodes. Ces couches peuvent influencer le potentiel généré. D'après Monfore et autres chercheurs, l'utilisation d'un courant alternatif n'évite pas ce problème [Monfore, 1968]. Hammond et Robson suggèrent que le comportement du béton peut être simulé par une combinaison en parallèle d'un condensateur et d'une résistance [Hammond et Robson,1955]. Le courant issu d'une telle combinaison est dérivé de l'équation 2.4 [Monfore, 1968]:

$$I = \frac{E}{Z} \tag{A.4}$$

où I = Courant (ampère)
E = Potentiel (volt)
Z = Impédance (Ohm)

La constante diélectrique complexe d'un matériau décrit l'étendue et la vitesse d'alignement de dipôles moléculaires dans un champ magnétique. L'équation de cette constante est donnée dans l'équation 2.5:

$$\epsilon = \epsilon' - j\,\epsilon'' \tag{A.5}$$

où ϵ = Constante diélectrique complexe
ϵ' = Constante diélectrique du matériau et mesure de l'étendue de l'alignement de dipôles moléculaires
ϵ'' = Mesure de la vitesse de l'alignement (ou la perte d'énergie électrique par frottement)

L'eau libre possède une constante diélectrique approximativement quarante fois supérieure à la plupart des matériaux solides, incluant le ciment et la roche. La valeur de la constante diélectrique d'un béton humide est une fonction complexe des propriétés diélectriques de ces composantes et l'état de l'eau dans le béton (en forme d'eau libre à liaison chimique ou adsorbée). La propriété diélectrique d'un matériau tel que le béton est utilisée pour l'étude de la teneur en eau du béton.

2.2.2 Propriétés électriques du béton

Les études les plus complètes sur ce sujet ont été réalisées par Hammond et Robson ainsi que par Monfore. Toutefois, il n'existe pas beaucoup d'information sur ce sujet dans la littérature.

Le béton humide se comporte comme un électrolyte possédant une résistivité de l'ordre de 10^4 X, une valeur proche de celle des semi-conducteurs. Un béton sec (au fourneau) possède une résistivité de 10^{11} X Il a été démontré que la résistance électrique du béton augmente avec l'âge. Cela est probablement dû à la diminution de l'eau libre par la déshydratation continuelle du béton [Lauer, 1991].

Il est important de noter que la résistivité des électrolytes diminue avec une augmentation de la température. Donc, la résistivité d'une pâte de ciment humide, d'un mortier et d'un béton doit aussi diminuer avec une augmentation de la température. Monfore démontre que la résistivité de la pâte de ciment, soumise à des températures de 40°F à 100°F, avait une diminution moyenne de la résistivité de 1% par degré d'augmentation de la température [Monfore, 1968]. Toutefois, Hammond et Robson montre que la résistance électrique d'échantillons en béton augmente si l'on élimine l'eau libre dans la pâte de ciment en les séchant au four.

Détermination de la teneur en eau du béton

La teneur en eau du béton est une donnée essentielle à la réalisation d'études portant sur le retrait ou la conductivité thermique du béton. Hors, comme la teneur en eau dans un béton influence ses propriétés diélectriques, il est possible de relier les deux paramètres ensemble. C'est ainsi que plusieurs chercheurs ont utilisé les mesures diélectriques pour déterminer la teneur en eau de la pâte de ciment Portland et du béton durci [Oleesky et Mohr, 1964].

Les instruments qui mesurent les constantes diélectriques s'appellent des instruments à capacitances. Plusieurs configurations sont disponibles sur le marché. Les électrodes sont connectées à une source de courant alternatif constante et elles produisent un champ électrique dans le matériau à l'étude. Le courant est mesuré et donne une indication de la teneur en eau du spécimen. En Amérique du nord, Bell et coll. (1963) mesurent les résistances et les facteurs de dissipation pour des disques en mortier et en béton de 76 mm de diamètre avec différentes teneurs en eau ainsi qu'à des fréquences de 10^6 Hz. Ces chercheurs montrent que la teneur en eau des spécimens est sous la marque de 6 % avec une précision de 0,25 %. Ces mêmes chercheurs ont aussi effectué des essais de la conductivité à fréquences faibles sur des prismes de 9.5 x 25 x 50 mm et ils trouvent des teneurs en eau avec une exactitude de près de 0,5 %. Knab et coll. indiquent que des études plus poussées sont nécessaires pour établir la fiabilité de cette méthode [Knab et coll., 1981].

Profil de l'infiltration d'humidité à travers le béton

L'utilisation de sondes de résistivité électrique pour tracer l'infiltration d'humidité dans le béton est discutée dans un article de Bracs et coll. en 1970. Dans cette étude plusieurs cubes en béton de 152 mm d'arête sont utilisés. Une vaste gamme de résistances à la compression est utilisée et les spécimens sont en période de cure pendant 14 et 28 jours. Les échantillons ont ensuite été séchés dans un fourneau, à 105 °C durant 24 heures. À la suite des étapes de la préparation, des mesures fréquentes de la résistance électrique sont effectuées sur une période de 120 jours. Les mesures sont prises entre 11 paires d'électrodes incrustées dans les échantillons au moment de la coulé.

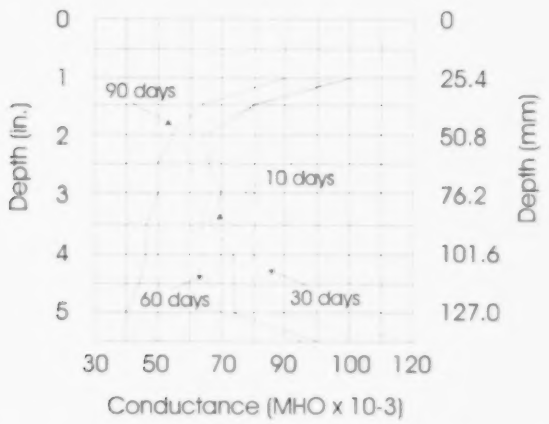


Figure A.3: Pénétration d'humidité à travers un spécimen cubique [Bracs et coll.,1970].

La résistance électrique locale est réduite par la présence d'humidité, ce qui a permis de déterminer la profondeur de pénétration de l'humidité et de tracer le profile. Les résultats montrent que les spécimens placés dans le fourneau sont complètement secs après quelques jours. Selon Bracs et coll., les résultats sont largement de nature qualitative et de nature comparative. Un exemple de profil d'humidité est donné à la figure A.3 [Bracs et coll., 1970].

Détermination de l'épaisseur d'un béton routier

Le domaine de l'exploration géophysique utilise depuis longtemps l'essai par résistivité électrique. L'application de cette technologie pour l'évaluation de l'épaisseur des matériaux s'est initialement effectuée au « South Dakota School of Mines and Technology ». En 1968, Morre propose une méthode d'auscultation employée pour la détection de l'épaisseur de pavés. Elle est en effet une adaptation de la méthode de résistivité utilisée dans le domaine de la géophysique et Moore réussi pour la première fois l'utilisation pratique de cette méthode aux États-Unis.

La méthode de résistivité électrique est basée sur le principe de la résistance au passage d'un courant électrique à travers un spécimen d'essai. Un béton routier possède une résistance qui diffère souvent de la résistance des matériaux souterrains. La méthodologie consiste à placer quatre électrodes les unes à la suite des autres à une distance égale sur la surface d'un béton routier (voir figure A.4). Le courant (I) passe à travers le béton entre les électrodes D1 et D4. La diminution de potentiel entre les électrodes D2 et D3 est notée par la suite. Au début de l'expérience, les électrodes sont placées à une distance de 25 ou 50 mm. Ensuite, la distance entre les électrodes est augmentée de façon proportionnelle jusqu'à une largeur quasi égale à l'épaisseur de conception de la dalle de béton.

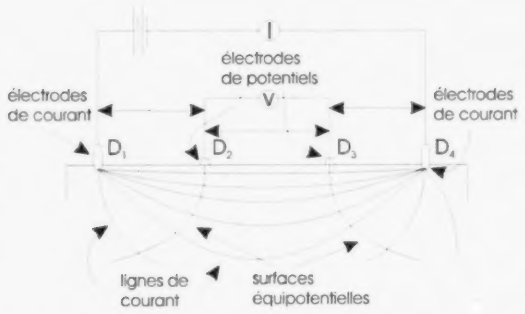


Figure A.4: Coupe transversale montrant les lignes de courant et les surfaces équipotentielles dans un milieu homogène [Robertshaw et Brown, 1955]

En théorie, la propagation du courant s'étend à une limite infinie en profondeur, mais l'intensité du courant subit une décroissance rapide. Pour des raisons pratiques, la pénétration du courant est considérée comme étant égal à la distance entre les électrodes. Lorsque la distance est petite entre les électrodes, comparée à l'épaisseur du béton routier, la presque totalité du courant circule à travers la couche supérieure. La résistivité apparente est ensuite enregistrée. Dans ce cas, la résistivité apparente est représentative de la résistivité actuelle du béton routier. Lorsque la distance entre les électrodes est grande, la majorité du courant atteint le niveau inférieur de la dalle de béton et la résistance apparente est enregistrée. La résistivité apparente est alors représentative de la résistivité actuelle du matériel inférieur. Lorsque les essais sont complétés, la résistivité P, pour un volume de 1 cm^3, est calculée d'après l'équation 2.6 [Moore, 1968]:

$$P = \frac{2\pi \times S \times E}{I} \tag{A.6}$$

où I = courant entre D1 et D4 (A)
E = diminution de potentiel entre D2 et D3 (volt)
S = distance entre les électrodes (cm)

La mesure de la résistivité électrique est relativement simple et l'équipement n'est pas coûteux. Ces deux facteurs jouent un rôle important sur l'application de cette technologie sur le béton. La difficulté majeure réside dans l'interprétation des données obtenues au chantier. Les résultats sont encourageants mais aucun autre rapport n'est écrit sur le sujet en raison d'un manque d'information sur les limitations du système d'interprétation [Robertshaw et Brown, 1955].

En 1972, Li et coll. rapportent que la résistivité électrique du béton varie de façon exponentielle avec la température. Plus la température est haute, plus la résistivité est basse. De plus, la résistivité est très dépendante de la teneur en eau du béton. Heureusement, toutes méthodes de résistivité électrique, qui tentent de déterminer l'épaisseur d'un béton routier, dépendent uniquement du ratio de la résistivité des matériaux dans les couches inférieures de la dalle de béton.

La méthode de résistivité électrique peut aussi faciliter la détermination de la profondeur de l'acier d'armature dans le béton routier. Ceci est influencé par la position des électrodes sur la dalle de béton. Par exemple, les résultats sont différents si les électrodes sont placées accidentellement directement au-dessus de l'armature au lieu d'être placées à une distance égale de chaque côté de l'armature. Une attention particulière est donc nécessaire pour ce type d'analyse. La mesure in situ de la résistivité électrique pour détecter la corrosion est parfois jumelée aux essais de « demi-cellule ». L'essai de « demi-cellule » permet de déterminer le potentiel de corrosion de l'armature dans le béton. Il est à noter que la vitesse de la réaction de corrosion est en partie dépendante de la résistivité du béton. Des études sur cette utilisation de la technique par résistivité électrique démontrent beaucoup de succès. Un point négatif de l'application de cette méthode est la nécessité de percer des trous dans le spécimen pour chaque sonde. L'agencement des sondes est similaire aux applications précédentes.

Limites de la méthode par résistivité électrique

La mesure des propriétés diélectriques du béton durci a un grand potentiel de succès si un système abordable et portatif peut être mis au point. L'utilisation des courants de hautes fréquences pour déterminer la teneur en eau du béton semble être l'obstacle majeur. Toutefois des recherches en cours aux États-Unis et en Europe tentent actuellement de franchir ces problèmes dans le but d'une utilisation éventuelle en chantier. Le développement des méthodes d'inspections par résistivité électrique pour le béton est restreint à des applications spécifiques. Pour cette raison, la technique n'est pas largement acceptée par l'industrie du béton. La technique est simple et peu coûteuse, mais elle possède un sérieux inconvénient: cette technologie n'est adaptable qu'au béton routier. Des recherches considérables sont nécessaires pour identifier adéquatement les effets de l'air entraîné, de la proportion des constituants, de la densité du béton ainsi que de l'armature sur la mesure de la résistivité électrique.

A.3 Les méthodes électromagnétiques

Au début des années 1900, il est établit qu'il est possible de transmettre des ondes électromagnétiques (EM) à travers l'espace et en enregistrer leurs réflexions. À la suite de cette découverte, il est démontré que des objets dans l'espace possèdent des caractéristiques de dispersion et de réflexion d'ondes EM différentes les unes des autres et voyagent dans l'espace à une vitesse constante et égale à celle de la lumière. Durant les années 1950, il a été reconnu que la vitesse et l'amplitude des micro-ondes varient d'un matériau à l'autre et ce en fonction de la distance traversée dans un matériau solide. Ces propriétés ont inévitablement été utilisées pour identifier et construire des profiles géologiques de matériaux souterrains [Clemeña, 1991].

A.3.1 Propagation des micro-ondes à travers un matériau:

La figure A.5 montre le principe de la propagation des micro-ondes à travers trois milieux différents. Suite à la pénétration du premier médium, l'onde se propage à une vitesse V2, exprimée sous la forme suivante:

$$V_2 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{r_2}}} \tag{A.7}$$

où V_2 = vitesse de l'onde (médium 2) (m/s)
c = vitesse de la lumière (m/s)
ε_{r2} = permittivité relative entre deux médiums (1et 2)

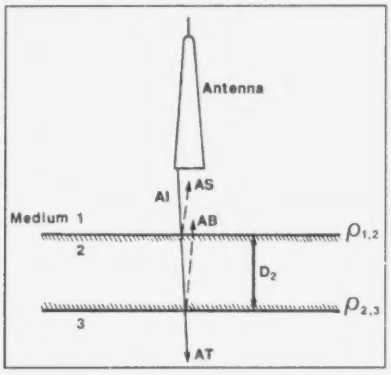


Figure A.5: Principe de propagation des micro-ondes [Clemeña, 1991].

L'énergie de l'onde est atténuée et son facteur de dissipation est lié à la conductivité électrique du deuxième milieu. Lorsqu'une portion d'ondes EM atteint l'interface du troisième milieu, une partie est reflétée à travers le deuxième milieu. Donc, en étudiant les vitesses de ces ondes EM, il est possible de déterminer la composition de plusieurs matériaux sous une surface [Clemeña, 1991].

Les micro-ondes possèdent des propriétés électromagnétiques et des longueurs d'ondes de l'ordre de 0,3 à 300 mm et des fréquences de l'ordre de 10^{12} à 10^9 Hz [Hassani et coll., 1989]. La nature électromagnétique de ces ondes permet d'en faire la réflexion, la diffraction et vient s'ajouter l'absorption. L'eau est une substance capable d'absorber ces ondes et celui-ci est à l'origine du développement d'une méthode de détermination de la teneur en eau de certains matériaux poreux comme la brique et le béton. La base de cette technique est décrite dans un article scientifique de Browne (1963) qui explique que l'absorption des micro-ondes est supérieure dans l'eau que dans un milieu où l'eau est dispersée. Les premiers rapports, qui datent de 1965, traitent de l'application de la technique des micro-ondes pour l'inspection des matériaux poreux [Boot et Watson, 1965]. Ces auteurs discutent des modes de transport des micro-ondes et ils décrivent l'atténuation des rayons de micro-ondes lorsque ces derniers traversent un mur ou une structure quelconque. L'atténuation est uniquement dépendante de la teneur en eau d'un matériau.

Boot et Watson ont construit un instrument en deux parties, qui consistaient en une radio émettrice portative, un récepteur composé d'un amplificateur et d'un détecteur d'ondes en cristal. L'émetteur et le récepteur sont placés sur des côtés opposés du spécimen, à des distances fixes. Le système est mis en marche et la différence d'atténuation, causée par le spécimen, est enregistrée. Un diagramme de calibrage est utilisé pour traduire les données en niveaux de teneur en eau du spécimen.

A.3.2 La méthode géoradar

Les géoradars du type « pulsations courtes » sont utilisés pour inspecter le béton. Ces systèmes transmettent une pulsation suivie d'un temps de pause. Durant la pause, la pulsation est reflétée par le matériau et reçue par un système d'acquisition. Un système géoradar de ce type englobe un unité de contrôle, une antenne monostatique (une antenne à transmission et à réception), un oscillographe et une source d'énergie.

Pour l'inspection du béton, il est recommandé d'utiliser une antenne qui émet des pulsations d'une durée de 1 ns ou moins. Avec de telles antennes, des couches de béton minces peuvent être identifiées et l'épaisseur mesurée. Si on assume qu'un béton quelconque possède une constante diélectrique de 6, il serait possible de mesurer des épaisseurs de 31 à 61 mm [Clemeña, 1991]. Toutefois, il est difficile de déterminer, au préalable, la profondeur de pénétration du système radar avant l'inspection. Ceci est le cas du béton armé où la teneur en eau et l'armature affectent la pénétration du radar.

Lorsqu'une pulsation électromagnétique générée par l'antenne traverse un médium, plusieurs réflexions sont produites aux interfaces qui possèdent une permittivité relative autre que celle du béton. Chaque pulsation électromagnétique reflétée atteint l'antenne à réception à un temps différent. Le temps d'arriver est gouverné par la profondeur de l'interface et la permittivité relative du matériau différent.

La constante diélectrique du béton est de l'ordre de 6 et parfois elle peut atteindre 12 lorsque le béton est saturé. Il est important de signaler que la permittivité relative d'un béton in situ varie non seulement à cause de sa teneur en eau, mais aussi à cause de sa conductivité et de sa composition minérale. Lorsqu'une pulsation électromagnétique atteint la surface du béton, une portion est reflétée à la surface et l'autre portion est réfléchie dans le béton. Au moment où la portion de la pulsation réfléchie atteint la mèche d'armature, elle est complètement reflétée et dispersée dans le béton. Cela est dû à la constante diélectrique de l'armature qui est considérée comme étant infini si on la compare à celle du béton. Le processus de réflexion et de dispersion de la pulsation se poursuit dans le béton jusqu'au moment où le signal est atténué et imperceptible par le système d'acquisition.

Cantor et coll. discutent d'une corrélation de 90 % entre les défauts trouvés par radar sur une chaussée de pont et les problèmes observés suites à des forages. Cette technique montre une capacité de prédire les endroits sur la chaussée qui peuvent succomber aux agents de détériorations. Avant de procéder à ces études, des essais exhaustifs sont effectués en laboratoire dans le but de calibrer le système radar. Ces chercheurs confirment que la méthode radar peut être utilisée avec un certain niveau de confiance [Cantor et coll., 1982].

Il existe toutefois un certain niveau d'inexactitude attribué à l'incapacité de l'antenne à réception de capter des signaux consécutifs à des intervalles très courtes. Donc lors d'une auscultation, le radar peut manquer une petite délamination au niveau de l'armature et à proximité de la surface du béton. Un autre problème lié à l'interprétation des résultats géoradar est le manque de compréhension des relations entre des signaux radars différents occasionnées par des défauts de différents types dans le béton [Clemeña, 1991].

Mesure de l'épaisseur du béton

La mesure de l'épaisseur d'une dalle de béton routier est essentielle pour le contrôle de la qualité de l'ouvrage lors de sa construction et de sa durée en service. La qualité du béton routier dépend énormément de l'épaisseur minimale de la dalle. Généralement, dans le but de respecter

des devis techniques, des forages sont nécessaires pour évaluer l'épaisseur de la dalle de béton. En plus d'être coûteux et lent, ce type d'inspections n'offre qu'une idée approximative de l'épaisseur réelle d'une dalle sur toute sa superficie. L'auscultation par géoradar a été utilisée comme une alternative au forage à plusieurs reprises sur des chaussées de ponts en béton. Le succès de cette méthode dépend beaucoup de la qualité de la réflexion du signal qui provient de limite inférieure de la dalle de béton. Cette réflexion permet de déterminer le temps de transite du signal électromagnétique. Ce temps permet de calibrer le système radar pour l'inspection de la dalle. Parfois, le système radar est installé sur une camionnette et l'inspection de grandes surfaces peut se faire très rapidement [Clemeña, 1991].

A.4 Les méthodes magnétiques

Les méthodes d'inspection magnétiques figurent parmi les plus vieilles techniques non destructives pour évaluer la présence de fissures dans des objets métalliques. En 1868, un dénommé M. Saxby utilise un compas magnétique pour trouver des fissures dans les canons de fusils de son usine. En 1917, Hoke observe que lors de l'usinage d'objets métalliques fixés à l'aide de pinces magnétiques, les résidus métalliques prennent la forme de champs magnétiques au niveau des fissures dans la pièce [Cartz, 1995]. Aujourd'hui, il existe plusieurs méthodes magnétiques pour évaluer les métaux. Pour de simplifier ce rapport et de se fixer sur des méthodes d'inspections qui peuvent aider à évaluer l'état de l'armature dans le béton, cette discussion porte sur deux de celles-ci, notamment la méthode par perte de flux et celle de l'observation des courants de Foucault.

A.4.1 Perte de flux

Cette technique nécessite au préalable un matériau ferromagnétique. Dans un état magnétisé, des lignes de flux magnétiques circulent dans le matériau et parcourent des distances entres deux pôles magnétiques [Lauer, 1991]. Idéalement, il n'y a pas de perte de flux magnétique dans un milieu homogène et libre de défauts. La présence d'une fissure qui intercepte les lignes de flux induit un changement dans la perméabilité magnétique du milieu [Hassani *et col.*, 1996]. La figure A.6 simplifie cette explication en démontrant l'observation d'une fissure, une sur le dessus de la pièce métallique et l'autre en dessous. Les diagrammes dans la partie supérieure de la figure A.6 montrent un schéma type du champ magnétique perturbé par la présence de fissures.

Des instruments portatifs et automatiques et des capteurs à petits diamètres sont susceptibles de détecter les moindres changements de flux dans un échantillon. Un système d'analyse spectrale en continu filtre les signaux et les analyses. La majorité des capteurs sont des bobines inductives ou des capteurs à forces électromotrices [Lauer, 1991]. Il existe plusieurs instruments de magnétisation sur le marché. Ils sont portables et faciles à manipuler [Bray et Stanley, 1997]. Une étude sur les instruments de mesure de la perte flux, qui sont portables, n'a pas donné les résultats escomptés. Une grande majorité des instruments disponibles sont très complexes et font partie de processus mécaniques industriels.

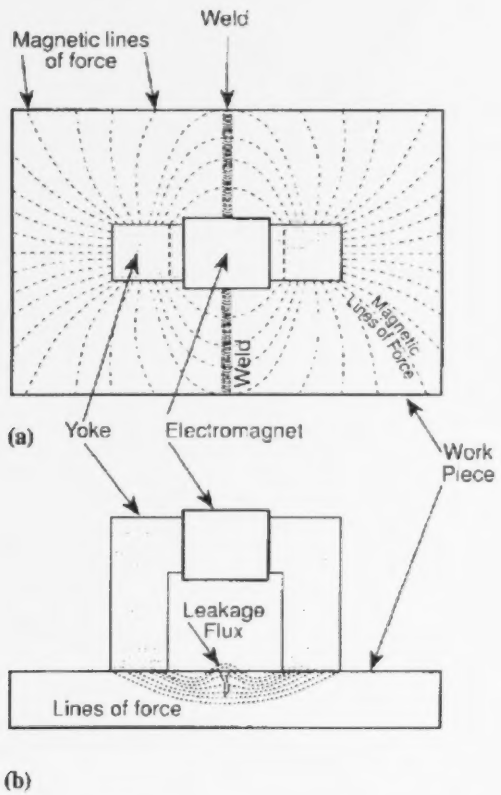


Figure A.6: Les effets des discontinuités sur le flux magnétique [d'après Cartz, 1995].

A.4.2 Courants de Foucault (Eddy Current)

La technique d'auscultation par courants de Foucault est répandue dans plusieurs grands secteurs industriels. Ces débuts se retracent jusqu'en 1830 par une étude de J.B. Foucault qui découvre les courants magnétiques qui portent son nom aujourd'hui [Cratz, 1995].

Cette technique électromagnétique s'applique uniquement sur des milieux qui possèdent la propriété de conductivité électrique. La production de courants de Foulcault s'effectue à l'aide de variations de champs magnétiques placés à proximité de l'échantillon à l'essai. La variation des champs s'effectue par le changement du niveau de courant dans une bobine qui fait partie d'un instrument de mesure. La propagation des courants de Foulcault se limite à des boucles près de l'instrument. Un instrument spécial, à induction électromagnétique (avec une ou plusieurs bobines), mesure les courants de Foucault. Souvent, les instruments commerciaux utilisent la même bobine pour générer les courants de Foucault et en faire la mesure [Bray et Stanley, 1997].

Cette technique sert à la détection de la corrosion et à la localisation de fissures internes dans les métaux tel que l'armature de béton. De plus, cette méthode fait ressortir la perméabilité magnétique de l'échantillon. Un défaut dans la matière métallique enduit la perturbation des courants de Foucault dans le spécimen tel qu'illustré à la figure A.7(c). Ce type d'auscultation pénètre très peu dans l'échantillon à l'essai [Cratz, 1995].

Un système d'inspection par courant de Foucault consiste en une source de champ magnétique variable. Une bobine fournie d'un courant continu, ayant une fréquence dans la gamme de 1kHz à 10 MHz, suffit pour la plupart des applications. Les nouveaux systèmes portatifs sur le marché sont très petits et d'une manutention simple. Selon le prix, certains systèmes sont fournis avec un ordinateur portatif et un logiciel de traitement de donnés sophistiqué. Ces dispositifs offrent une grande flexibilité. D'autres systèmes incorporent l'analyse des résultats dans des instruments compacts où se fait l'acquisition et le traitement des données. Cependant, les options se limitent à quelques choix. Il y a plusieurs fournisseurs au Canada et aux États-Unis [Cratz, 1995].

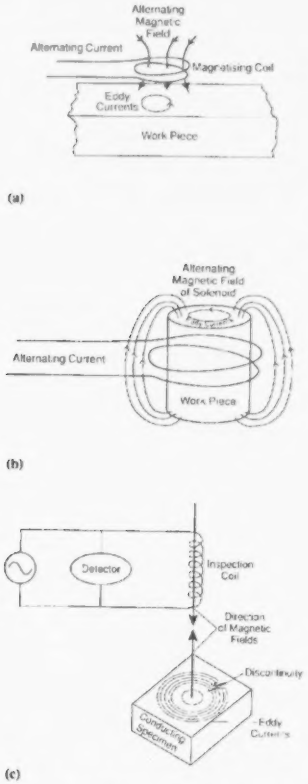


Figure A.7: Schéma de trois applications par courants de Foulcault [Cratz, 1995].

A.5 La méthode par thermographie infrarouge

Depuis les années 1980, la méthode par thermographie infrarouge est utilisée sur des chaussées de ponts et d'autoroutes, des garages et des aires de taxi dans les aéroports [Weil, 1991]. La thermographie infrarouge est basée sur le principe qu'une anomalie dans un matériau affecte la circulation de la chaleur à l'intérieur de celui-ci. Les changements de circulation de la chaleur provoquent des différences de température sur la surface du matériau. Donc, en mesurant la température sur la surface, durant des conditions de circulation de la chaleur, on peut déterminer l'emplacement d'anomalies dans le béton.

En 1983 aux États-Unis, une étude prouve pour la première fois que la thermographie infrarouge peut être utilisée sur des autoroutes. Certaines expériences ont lieu sur le Dan Ryan Expressway, près de Chicago. L'instrumentation est montée sur une camionnette spécialement adaptée pour ce type d'auscultation. De cette façon, il n'est donc pas nécessaire de fermer une voie de l'autoroute. Sur une distance de 11 milles (17,6 km), l'auscultation est réussie et n'a durée que 14h, étalée sur 5 jours différents [Weil, 1991].

Les températures sur la surface d'une dalle de béton sont dépendantes de trois facteurs: la composition souterraine, les conditions sur la surface du béton et l'environnement. En principe, la propagation de la chaleur d'une région chaude à une région froide ne peut être empêchée. La circulation de la chaleur est ralentie uniquement par les propriétés isolantes du matériau dans lequel la chaleur circule. Les anomalies dans le béton possèdent souvent une valeur de conductivité thermique différente.

Il y a trois façons fondamentales de réussir le transfère d'énergie thermique d'une région chaude à une région froide: la conduction, la convection et la radiation. Les anomalies, telles que des vides jumelées à un béton de faible densité, réduisent la conductivité thermique. Celles-ci réduisent donc les propriétés de conduction d'énergie, sans pour autant augmenter les effets de convection. En général, les vides dans le béton empêchent la formation de courants de convection. Cela est dû à un manque de mouvement d'air dans la fissure. Un béton de bonne qualité possède une faible résistance à la circulation de la chaleur. Dans ce cas, l'effet de convection est négligeable.

La radiation a le plus d'influence sur la capacité d'une surface à transférer l'énergie. La radiation d'énergie est exprimée en terme d'émissivité. L'émissivité est strictement une propriété de la surface d'un matériau. Par exemple, sur des surfaces rugueuses la valeur d'émissivité est élevée contrairement à des surfaces lisses. Les valeurs d'émissivité varient entre 1.0 et 0. La norme 1.0 est basée sur la radiation émise par un "blackbody" parfait. Théoriquement, un "blackbody" est une source de radiation qui émet une quantité de radiation maximale à une température donnée. Donc, l'émissivité d'un "blackbody" est égale à 1.0 [Weil, 1991]. Un béton à la surface rugueuse possède une émissivité de 0,95, tandis qu'un métal à la surface brillante à une émissivité de 0,05. Donc, lors de l'auscultation, l'investigateur doit prendre note des différentes textures des surfaces étudiées [Weil, 1991].

Le soleil est souvent utilisé comme source de chaleur. Cette source permet une distribution d'énergie constante sur une surface à grande superficie. Il est important de noter que la direction de la circulation de la chaleur n'influence pas l'interprétation des données. Ceci permet donc d'utiliser la chaleur accumulée dans les matériaux souterrains pour l'auscultation. Il est nécessaire d'utiliser cette chaleur dans des endroits à l'abri du soleil. Il faut aussi prendre note des conditions de la surface à ausculter telles que la radiation solaire, le climat nuageux, la

température ambiante, la vélocité du vent et l'humidité. Donc, il est évident qu'une étape de calibrage du système à thermographie infrarouge est nécessaire.

Un système complet d'auscultation et d'analyse à thermographie infrarouge englobe quatre grandes composantes: à

1) Sonde infrarouge:
- Le système optique est transparent aux ondes courtes de radiation infrarouge.
- Le mécanisme de détection est, en général refroidit, jusqu'à -196°C.
  Ceci permet de déceler des variations de température de l'ordre de 0.1°C.

2) Ordinateur:
- L'ordinateur permet une visualisation instantanée sur moniteur des variations de températures sur la surface auscultée.

3) Système d'acquisition de données:
- Ce système inclut un convertisseur analogue-digital, un ordinateur à écran couleur et un logiciel d'analyse.
- L'ordinateur permet de transférer les données sur vidéocassettes et sur disquettes.

4) Équipements d'enregistrements:
- Plusieurs types d'instruments sont utilisés à cette fin.

À la suite de cette discussion, il est donc possible de détecter des délaminations et d'autres anomalies trouvées dans un béton routier. Toutefois, jusqu'à présent il est impossible de déterminer la profondeur et l'épaisseur d'une fissure, mais on peut déterminer le périmètre d'une délamination. Pour la détection de fissures, il est recommandé de jumeler la thermographie infrarouge au "Ground Probing Radar" [Weil, 1991].

A.6 L'auscultation par les émissions acoustiques

Lorsque des éléments en béton sont soumis à des charges dynamiques ou statiques et subissent une déformation plastique ce qui engendre des émanations audibles du spécimen qui peuvent être décelées. Sous certaines conditions, des sons sont parfois entendus avant d'atteindre la résistance ultime de l'échantillon à l'essai. Aujourd'hui, il est possible de détecter des sons à 10% de la résistance ultime grâce à l'avancement technologique dans le domaine des capteurs, amplificateurs et oscillographes [Mindess, 1991]. Les sons produits par un échantillon ou une structure soumis à un système de contraintes sont appelés des *émissions acoustiques*. L'organisation « The American Society for Testing and Materials (ASTM) » définit comme suit le terme *émission acoustique*[*] :

> « ...classe de phénomène où des ondes élastiques transitoires sont générées par la libération soudaine d'énergie provenant de sources à l'intérieur même d'un matériau. »

[*] Traduit à partir du standard ASTM E610-82: "*Standard definitions relating to acoustic emission.*", ASTM, Philadelphia, Vol. 2.03, p. 373.

Pour le cas des matériaux hétérogènes tel que le béton, les émissions acoustiques sont liées principalement aux facteurs suivants [Mindess, 1991]:

1) Processus de fissurations microscopique ou macroscopique.
2) Glissement entre l'armature et le béton.
3) Fissuration des fibres ou le bris de liaison entre les fibres et le béton dans des bétons composites.

Au début des années 1950, Kaiser découvre le phénomène connu aujourd'hui sous le nom de "l'effet Kaiser". L'effet Kaiser explique l'irréversibilité des signaux d'émissions acoustiques [Lim et coll., 1989]. Il décrit qu'il y a absence d'émissions acoustiques (a un niveau de sensibilité fixe) provenant d'un échantillon soumis à des contraintes, jusqu'au moment où la charge de contrainte appliquée précédemment est surpassée. Il faut noter que ces études ont été effectuées sur des métaux et que l'effet Kaiser provenant des métaux est un effet Kaiser "pure" [Mindess, 1991]. Dans le cas du béton, Rüsch découvre que l'effet Kaiser est présent seulement dans une gamme de contrainte allant de 0 à 70-85% de la résistance ultime [Rüsch, 1959]. L'effet Kaiser est d'une grande importance pour Green, qui est le premier à faire la preuve scientifique que les émissions acoustiques du béton sont causées par des ruptures internes. Il a aussi noté que l'effet Kaiser peut un jour devenir un outil important pour déterminer la charge maximale appliquée sur une structure en béton dans le passé [Green, 1970].

Principes de l'émission acoustique

Une émission acoustique est causée par une déformation plastique ou par la fissuration d'un matériau. Elle crée instantanément une onde à l'intérieur du matériau qui se propage sous la forme d'ondes de compression et de cisaillement. Lorsque ces ondes de contraintes sont captées par un instrument récepteur, ce dernier répond aux mouvements de la surface du matériau. Certains défis existent quant à la réception des ondes de contraintes, par rapport à la nature de l'onde, la géométrie du spécimen et les caractéristiques des récepteurs. D'ordre général, il y a deux types d'ondes d'émission acoustique de base qui peuvent être générés :

1) Émission continue: « Une description qualitative des signaux produits par des événements rapides d'émissions acoustiques » [ASTM E610-82, 1987]. Ces émissions sont généralement générées par un événement tel que la déformation plastique des métaux.

2) Émission à éclatement: « Une description de signal discret associé à une émission indépendante qui a lieu à l'intérieur d'un matériau » [ASTM E610-82, 1987]. Ces émissions ont lieu lors de l'augmentation de la fissuration de matériaux fragiles.

Les émissions à éclatement sont typiques des événements de surcharges sur des spécimens en béton. Il est important de noter que les émissions acoustiques qui se propagent dans le béton le font sur une grande gamme de fréquences. Il est apparent, d'après les recherches de Robinson (1968), Wells (1970) et Green (1970), qu'il n'existe pas de gamme de fréquence précise sur laquelle une auscultation peut se concentrer pour la vérification des anomalies dans

une masse du béton. Les fréquences utilisées lors de leurs recherches varient de 2 kHz à 400 kHz. Tanigawa et coll. (1979) démontrent que lorsque leurs spécimens sont sujets à des contraintes les fréquences émises semblent plus faibles lors de la relaxation de la contrainte et plus hautes lors de l'augmentation de la contrainte. Le tableau 2.1 présente plusieurs méthodes d'analyse des signaux

Tableau A.1: Méthodes d'analyses d'émissions acoustiques

MÉTHODES:	DESCRIPTION:
① Le comptage d'émissions acoustiques. ("Ring-Down" counting)	- Ceci est la méthode la plus simple pour caractériser un événement d'émission acoustique. - On compte le nombre de fois que le signal acoustique dépasse un seuil préétablit durant une période d'essai. - Il y a trois méthodes de comptage: 1) la somme totale, 2) le taux de comptage et 3) l'amplitude de la pulsation moyenne. - Cette méthode est affectée par les caractéristiques des récepteurs, la géométrie du spécimen (qui peut causer des réflexions internes de l'onde). Cette méthode reflète peu la nature indicative de l'émission acoustique.
② La sommation d'événements	- En reconnaissant la fin des émissions à éclatements, celles-ci peuvent être comptées. Des circuits électroniques sont conçus à cet effet. - Cette méthode n'offre pas d'information sur les amplitudes générées par les émissions acoustiques.
③ Le temps de monté	- Cette méthode observe la différence de temps entre la première occurrence du signal et l'amplitude maximale du signal. - Il est parfois possible de déterminer le mécanisme des fissurations internes dans le béton.
④ La durée du signal	- Ici, la durée d'une émission acoustique simple est mesurée. - Cette technique peut mener à la détermination du mécanisme des fissurations internes dans le béton.
⑤ La distribution de l'amplitude	- Cette méthode utilise les sommets d'amplitudes pour analyser le béton. - Il est parfois possible de trouver les sources des émanations acoustiques.
⑥ L'analyse de fréquences	- Cette technique est liée au spectre de fréquences des événements individuels des émissions acoustiques. - La méthode requiert une analyse par transformation Fourier discrète (FFT). - Il est possible de faire la distinction entre différents types d'événements acoustiques.
⑦ L'analyse par émission d'énergie	- Cette technique donne une indication de la quantité d'énergie émit par un événement acoustique.
⑧ La position de défauts	- En utilisant plusieurs récepteurs, il est possible d'analyser la différence du temps de réception des ondes provenant des émissions acoustiques. - La différence donne une indication de la position des défauts dans un matériau.
⑨ L'analyse de la forme de l'onde de l'émission acoustique	- Cette méthode utilise la récente innovation de la théorie de la "déconvolution". Elle est suggérée par plusieurs chercheurs pour l'analyse de la forme d'une onde dans le but de déterminer le volume, l'orientation et le type de microfissure dans le béton.

Instrumentation

L'instrumentation utilisée pour l'analyse des ondes d'émissions acoustiques est disponible par l'entremise de plusieurs manufacturiers. Cependant, il est important de noter que le développement technologique de l'instrumentation a vite dépassé le niveau de compréhension théorique de la nature des ondes élastiques résultantes de la microfissuration du béton. Ci-

dessous se trouvent les éléments importants d'un système moderne de détection d'émissions acoustiques [Mindess, 1991]:

1) Capteurs/émetteurs: Les capteurs piézo-électriques (CPZ) sont utilisés pour convertir les déplacements de surface en signaux électriques. La production de voltage, provenant des capteurs, est directement proportionnelle à la déformation du CPZ, qui elle, dépend largement de l'amplitude des ondes à la surface d'essai. Ces capteurs ont une impédance élevée et ils produisent des signaux électriques relativement faibles, typiquement de 100 μV. Il existe deux types de capteurs et d'émetteurs: à bande de fréquence large et à bande de fréquence étroite. Les capteurs à bande de fréquence large sont sensibles aux événements acoustiques dans la gamme de plusieurs centaines de kHz. Les capteurs à bandes étroites sont restreints à certaines gammes de réponses fréquences à l'aide de filtres. Lors des essais, il est essentiel de s'assurer que le capteur piézo-électrique est directement en contact avec le spécimen.

2) Préamplificateur: Dû à la faible production de voltage du matériau piézo-électrique, un préamplificateur est souvent intégré dans le capteur. Typiquement, l'augmentation se situe dans la région de 40 à 60 décibels (dB). Le gain en décibels est illustré par l'équation 2.8 [Mindess, 1991]:

$$Gain(db) = 20\log\frac{V}{V_1} \qquad \text{(A.8)}$$

où V = amplitude du signal de sortie (volt)
V_i = amplitude du signal d'entrée (volt)

3) Filtres: Les filtres éliminent les signaux d'émissions acoustiques à l'extérieur de la gamme de fréquence d'intérêt.

4) Amplificateur: Un amplificateur additionnel peut augmenter la puissance des signaux de 20 à 60 dB.

5) Sélectionneur: Un sélectionneur peut imposer un voltage limite qui aide le comptage des signaux acoustiques par des techniques telles que discutées dans le tableau 2.1.

En plaçant des capteurs sur les fondations de pylônes, il est peut être possible de déterminer le niveau de charge sur la structure. Cette technique nécessite toutefois plusieurs capteurs et émetteurs pour l'auscultation, ce qui augmente significativement le coût de cette technique. En général, se sont les capteurs et émetteurs qui coûtent le plus cher de toutes les pièces de l'instrumentation. L'efficacité de ce système par température froide ne figure pas dans la littérature, donc il est difficile de porter de conclusions sur cet aspect pour des applications dans le grand Nord québécois. Afin de déterminer l'évolution de l'état des contraintes dans la

(les) fondation (s), il faut connaître au préalable la contrainte in situ de la structure. Ceci dit, il faut donc entamer une étude par un autre moyen pour évaluer l'état de contrainte.

Études de cas

En 1992, Momayez et Hassani démontrent la faisabilité d'utiliser l'effet Kaiser pour évaluer l'état des contraintes in situ dans des mines souterraines. Il va de soi que cette technique peut s'appliquer aux fondations en béton. Saleh *et col.* (1997) montrent, par voie d'émissions acoustiques, l'application de cette méthode pour sonder le progrès de l'injection d'une dalle de béton. Li et col. (1998) démontrent l'application de la technique par émissions acoustiques pour l'étude du développement de la corrosion d'armature dans le béton.

A.7 Les méthodes par ultrasons

Les méthodes à ultrasons sont utilisées pour mesurer l'uniformité et la résistance à la compression du matériau. De plus, les ondes à ultrasons peuvent être employées pour détecter des fissures et des cavités dans les structures.

La méthode d'auscultation par ultrasons la plus courante pour l'évaluation des structures en béton est la méthode par vélocité de pulsation. Elle a été utilisée avec succès autant en laboratoire que sur le chantier. Il est possible d'utiliser cette technique pour évaluer la qualité d'un béton ainsi que pour en faire l'analyse de sa détérioration. La détermination du module d'élasticité dynamique et du rapport de Poisson est l'utilisation la plus directe de ce système et la plus acceptable du côté théorique. De nombreux chercheurs ont publié des résultats sur ces deux propriétés [Naik et Malhotra, 1991].

La méthode par vélocité de pulsation procure aux utilisateurs un moyen efficace pour déterminer la résistance du béton in situ ou préfabriqué. Une corrélation entre la vélocité des pulsations et la résistance du béton est toutefois nécessaire pour faire une évaluation sur le chantier. Plusieurs chercheurs indiquent qu'il ne faut pas estimer la résistance en compression du béton directement via la vélocité des pulsations. L'estimation de la résistance en chantier doit se faire uniquement à la suite d'une corrélation obtenue à la suite d'essais en laboratoire sur des spécimens de béton du même type que trouvé en chantier [Naik et Malhotra, 1991]. Les standards RILEM (Europe), ASTM (États-Unis) et le British Standards Association (Grande-Bretagne), suggèrent des procédures pour établir ces corrélations.

La méthode par vélocité de pulsations peut également être très utile pour l'étude de l'homogénéité et de la qualité du béton. L'hétérogénéité dans le béton crée des dispersions de pulsations. Ces dispersions sont causées par des facteurs indirects tels que la source d'approvisionnement du béton, les ingrédients du mélange et les problèmes de consolidation (vibration) lors de la mise en place du béton en chantier. Il est possible de faire des comparaisons qualitatives de bétons in situ. D'autres applications sont couramment utilisées telles que: la vérification de la densité et la localisation d'alvéoles dans le béton. Dans un oeuvre de grande importance sur le développement de la technique par ultrasons, McHenry et Oleson (1967) citent dix cas types où la mesure des vélocités de pulsations est un supplément avantageux pour la détermination de procédures de réfections de barrages.

Elvery et Din (1969) montrent qu'il est parfois avantageux d'utiliser les résultats dynamiques de la résistance à la compression, qui proviennent des vélocités de pulsations, plutôt que ceux des essais statiques de compression sur des échantillons de béton prélevés par carottage. Le but de ces études a porté sur la détermination de la résistance en flexion de poutres

en béton armé. Les auteurs mettent en évidence la possibilité, via la méthode à ultrasons, de clairement identifier à l'intérieur des poutres des régions de résistances inférieures et évaluent l'influence de ces zones sur le comportement en flexion des poutres.

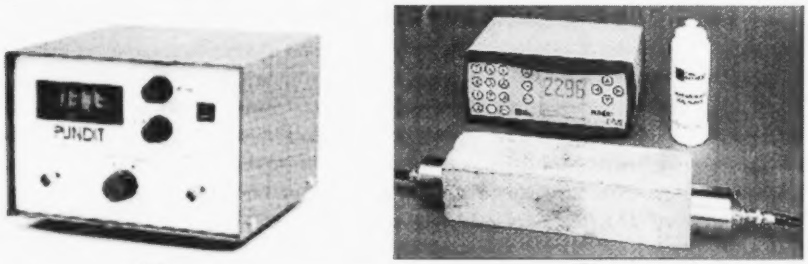
Aujourd'hui, la majorité des avances technologiques s'effectuent en laboratoire. Lozev *et col.* (1996) présente une étude de la consolidation du béton à l'aide d'un interféromètre à pulsation d'ultrasons. Dans leur recherche, ils établissent une corrélation entre le niveau de consolidation du béton et la vitesse de propagation des ultrasons. Ils ont démontré l'influence importante des facteurs du processus de cure sur la vitesse de propagation des ondes. Ils terminent leur recherche en affirmant que leur méthode est efficace pour l'évaluation du niveau de consolidation pendant et après la période de cure.

En 1998, Selleck *et col.* étudient le phénomène des fissures distribuées à l'aide de la technique par ultrasons. Les faits saillants de leur étude sont la découverte que les ondes d'ultrasons sont peu susceptibles à la microfissuration du béton. Cependant, l'amplitude des signaux change considérablement. Un aspect important de cette recherche est l'utilisation d'un processus de gel dégel pour réaliser le niveau de microfissuration voulue. Malgré une diminution de la vitesse de propagation des ondes de compression au fur et à mesure que les cycles de gel dégel progressent, le taux de diminution est faible. Les auteurs de ce programme de recherche indiquent qu'une diminution de 25 à 50 % du niveau de module d'élasticité dynamique correspond à une diminution de 3 à 9 % de la vitesse de propagation des ondes.

Instrumentation

La compagnie CNS Farnell de l'Angleterre, offre maintenant deux versions de son système par ultrasons populaire soit le système PUNDIT. La nouvelle génération du PUNDIT s'appelle le système PUNDIT *Plus*. Ce nouvel outil offre la possibilité d'enregistrer les données et de fournir immédiatement le module d'élasticité dynamique du béton. La figure 2.9 montre les deux systèmes ultrasons. Les deux systèmes sont fournis avec un capteur et un émetteur de fréquence nominale de 54 kHz, soit la norme dans l'industrie. Cette fréquence nominale limite la profondeur d'auscultation ainsi que l'épaisseur minimale du béton pouvant être sondée. Pour ces capteurs, la limite minimale est de 74 mm pour une vitesse d'onde de compression de l'ordre de 4000 m/s [CNS Farnell, 1994].

Cette technique est rapide et facile à effectuer même dans des conditions in situ difficiles. Il est possible de déterminer la signature dynamique d'un élément de béton ainsi que d'évaluer la profondeur de fissures qui apparussent en surface. Un des inconvénients de ce type d'essais est la nécessité d'avoir accès à deux surfaces d'essais pour les tests de vélocités de pulsation. Dans le béton, l'armature peut jouer un rôle important sur l'interprétation des résultats, il faut donc connaître au préalable la configuration de l'armature avant d'entamer la campagne d'auscultation. Les systèmes sont portables, dans la limite qu'une source de courant est disponible. Quelques modèles sont à batteries.



(a) (b)

Figure A.8: Systèmes PUNDIT de la compagnie CNS Farnell Ltée. (a) Système traditionnel; (b) système PUNDIT *Plus*.

A.8 Les méthodes mécaniques : la méthode *MSR Impact-écho*

Les travaux de recherches à l'Université McGill ont démontré le potentiel du système *MSR Impact-Écho*, comparé aux méthodes précédentes, pour détecter et localiser avec précision les fissures, les délaminations et les vides dans le béton. L'attrait de ce système réside dans le fait qu'elle est une méthode entièrement non destructive, qu'elle peut détecter et localiser les fissures avec une très grande précision, qu'elle est rapide et facile à utiliser et enfin elle peut fournir une image détaillée de l'ensemble de la structure en termes de ses propriétés élastiques et de sa résistance. Cette technique est basée sur l'étude d'ondes microsismiques.

L'utilisation d'un impact pour produire une onde n'est pas une idée nouvelle. Un impact mécanique évite le besoin de se procurer un transducteur à émission d'ondes de grandes dimensions (voir les méthodes à ultrasons). Toutefois, l'onde de contrainte générée par un impact possède une direction moins précise que l'onde émise par un émetteur à grand diamètre. L'onde se propage dans toutes les directions sous la forme d'hémisphères et crée des réflexions arbitraires. C'est d'ailleurs pour cette raison que les méthodes par impacts sont utilisées sur des structures telles que des pieux. La géométrie de ces structures présente l'avantage de réduire les réflexions et la perte de signal.

Principes de base

Une pulsation (onde) est introduite à l'intérieur d'un spécimen en béton par le biais d'une source d'impact d'origine mécanique. L'onde de contrainte se propage alors dans le matériau sous la forme d'un train d'ondes hémisphériques. Ces ondes s'appellent des ondes de front. Les ondes de front sont constituées à la fois d'ondes de compression et de cisaillement. Les ondes de Rayleigh se propagent en s'éloignant de la source d'impact. Les ondes de compression et de cisaillement sont reflétées par les interfaces internes du matériau et les bornes du spécimen. Ces ondes sont par la suite reflétées en forme d'écho à la surface où l'impact est produit. Les échos produisent des déplacements à la surface qui sont captées par un récepteur et ensuite enregistrés sur un oscilloscope digital. L'oscilloscope enregistre les trois formes d'ondes discutées précédemment. L'onde Rayleigh produit toujours un signal d'une amplitude plus grande que les ondes de compression et de cisaillement grâce à des mouvements elliptiques de surface. Toutefois, ces ondes ne sont pas considérées dans l'analyse MSR Impact-Écho à cause de leur faible pénétration en profondeur. L'onde de compression fait partie de l'information captée par le récepteur telle que vue à la figure A.9.

Analyse des données

La méthode d'analyse des données par l'étude des fréquences est un développement majeur du système MSR Impact-écho. Les ondes de compression sont produites par un impact et subissent des réflexions multiples entre la surface d'essai et l'interface de réflexion. Chaque fois que l'onde de compression arrive à la surface, celle-ci produit un déplacement qui est une caractéristique de l'amplitude de la réflexion. Donc, l'onde de propagation possède une caractéristique périodique; la fréquence (*f*) dont la définition algébrique est donnée par l'équation 1:

$$f = \frac{C_p}{2D} \quad \text{(Hz)} \tag{A.9}$$

où Cp = Vitesse de l'onde de compression (m/s)
D = Profondeur de l'interface de réflexion (m)

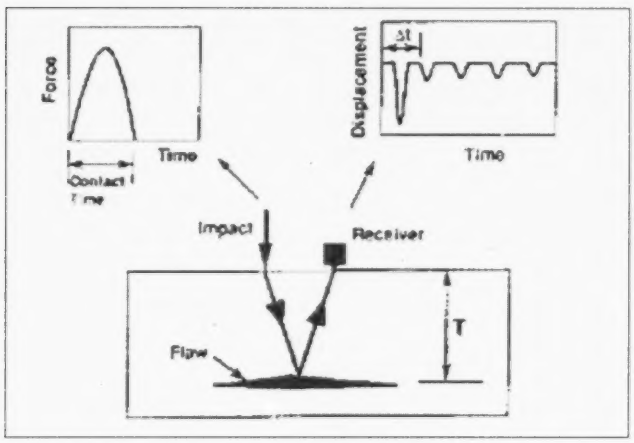


Figure A.9: Principe de la méthode MSR Impact-écho.

L'onde captée par l'oscilloscope est transformée du domaine de temps au domaine de fréquence. La transformation s'effectue à l'aide des transformations Fourier discrète (FFT). Le spectre des amplitudes de fréquences captées par le récepteur permet, grâce à cette méthode d'analyse, d'identifier les fréquences dominantes de l'onde de compression et de ces échos. Pour des dalles en béton, la fréquence qui détermine l'épaisseur d'un spécimen est souvent celle qui est dominante dans le spectre. Cette valeur est par exemple utilisée pour calculer la profondeur d'une anomalie en utilisant l'équation 1. La figure 2.11 illustre cette explication.

Le temps de contact

La durée de contact entre le spécimen et la source d'impact est un aspect clé de la méthode MSR Impact-écho. En effet, le temps de contact détermine le contenu fréquentiel du train d'onde généré par la source d'impact. Ceci implique que le temps de contact sur la surface

détermine les dimensions, de même que la profondeur des défauts qui peuvent être observées sous la surface. Plus le temps de contact est court, plus le contenu fréquentiel de l'onde est caractérisé par des composantes de fréquences élevées (faibles longueurs d'ondes). Il est ainsi plus facile de détecter des défauts de faibles envergures de même que des anomalies localisées très près de la surface de contact. Pour ces raisons, il est recommandé d'utiliser un temps de contact court pour les essais sur dalles de béton. À première vue, la composante fréquentielle la plus élevée (f_{max}), ayant une forte amplitude dans le train d'onde, est équivalente à l'inverse du temps de contact. Par exemple, un temps de contact de 100 µs est équivalent à une fréquence maximale d'environ 10 kHz.

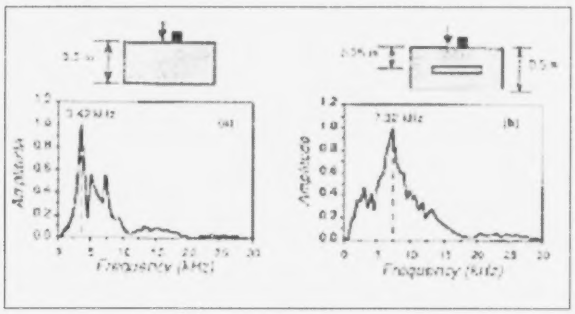


Figure A.10: Exemples de spectres d'amplitudes et la détection d'une fissure.

Les sources d'impacts ont des formes variées, mais les plus populaires prennent la forme de marteaux ou de sphères d'acier. Les marteaux produisent des énergies d'impact élevées dû au temps de contact long (> 1 ms) sur la surface. Ce temps de contact est utilisé sur des structures élancées en béton, mais n'est pas acceptable pour des structures telles que des dalles et autres structures moins élancées. En utilisant des sphères ou des sources d'impacts à ressort et à bouts sphériques, des temps de contacts de 20 à 60 µs peuvent être générés. Les sphères d'impacts possèdent un avantage important sur le marteau; le temps de contact est directement proportionnel au diamètre de la sphère. Cette simplicité et versatilité expliquent ainsi la popularité de cette méthode auprès des chercheurs.

La technique MSR Impact-écho possède plusieurs capacités, dont celle de déterminer les propriétés dynamiques du béton. Les propriétés dynamiques en question sont le module d'élasticité et le rapport de Poisson, soit deux paramètres d'importance dans l'étude des structures en béton. Le tout peut maintenant ce réaliser en auscultant une seule surface d'une structure. Notons que les équipements développés jusqu'à présent sont limités à des utilisations en laboratoire uniquement.

Une particularité de la technique MSR Impact-écho est l'étude de deux formes d'ondes, soit les ondes de compression et les ondes de cisaillement. En combinant les fréquences de réflexion de ces deux ondes, on peut déterminer les propriétés dynamiques du béton [Hassani et col., 1997]. Il a fallu plus de quatre (4) ans de développement et d'essais pour aboutir à cette technique d'évaluation non destructive. La figure A.11 illustre schématiquement le concept de la méthode MSR Impact-écho.

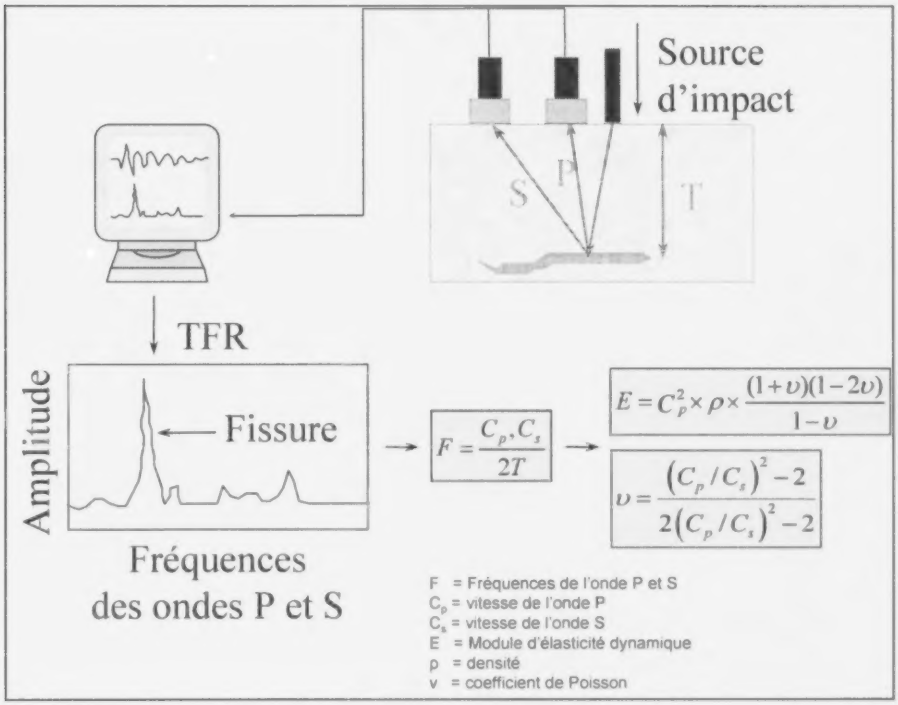


Figure A.11: Vue schématique de la méthode MSR Impact-écho.